

Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung
an der Technischen Hochschule Braunschweig



Untersuchung zur Klärung und Beseitigung
der Ursachen für das Auftreten von Schwind-
rissen in Gußasphalt- und Mastixbelägen

Bearbeitet von:

o. Prof. Dr.-Ing. Th. Kristen und Dipl.-Ing. E. Schönlan

Die Arbeit wurde ausgeführt im Auftrage des Herrn
Bundesministers für Verkehr, Bonn

Braunschweig, im Juli 1954

JK 625.851.036.32.00.15

G l i e d e r u n g

	Seite
1. Einleitung und Problemstellung	3
2. Bisherige Untersuchungsergebnisse zur Klärung des Verhaltens von Asphalten bei tiefen Temperaturen	7
3. Wahl der Prüfbedingungen	10
4. Verwendete Materialien	12
5. Versuche zur Bestimmung einiger Eigenschaften von Asphaltmischungen bei verschiedenen tiefen Temperaturen	
5.1 Ausdehnungskoeffizient	15
5.2 Wärmeleitzahl und spezifische Wärme	18
5.3 Elastizitätsmodul	22
5.4 Abgrenzung des plastischen Verformungsbereiches gegenüber dem elastischen	33
6. Laboratoriumsversuche zur Erzeugung von Rissen in Prüfbelägen	39
7. Beurteilung der Versuchsergebnisse	68
8. Schlußbetrachtung	71
Literaturverzeichnis	73
68 Anlagen	

1. Einleitung und Problemstellung

Ziel dieser Arbeit war die Klärung des Einflusses von reiner Abkühlung auf die Rißneigung von Gußasphalt- und Mastixbelägen verschiedener Zusammensetzung, die im Straßenbau als Straßenbeläge sowie im Hochbau als Fußboden- und Dachbeläge Verwendung finden.

Bei Straßenbelägen geht von den Rissen infolge der Beanspruchung durch den Verkehr eine langsame Zerstörung des Fahrbahnbelages aus. Im Brückenbau kann zusätzlich dazu der in manchen Fällen erwünschte Schutz der Unterkonstruktion vor Feuchtigkeit Zutritt aufgehoben werden.

Bei Verwendung als Fußbodenbelag im Hochbau sind Temperaturrisse kaum von Bedeutung, da Fußbodenbeläge im allgemeinen nur innerhalb der Gebäude verlegt und damit keinen übermäßigen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind. Dachbeläge sind dagegen im Winter von oben her einer starken Abkühlung unterworfen. Da die Hauptfunktion eines Dachbelages neben der Wärmedämmung in der Abdichtung des Bauwerkes gegenüber Feuchtigkeit besteht, ist bei Auftreten von Rissen sofort eine Gefahr für die Dachkonstruktion bzw. für die unter dem Dach liegenden Räume gegeben.

Neben der Beanspruchung der Beläge auf Grund ihrer Zusammenziehung bei Abkühlung können Risse durch dynamische Einflüsse entstehen. Diese Beanspruchungen werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

Bei Abkühlung zieht sich der Belag zusammen. Infolge der Einspannung eines Flächenteilchens in einer Fläche von größerer Ausdehnung ist die Zusammenziehung in horizontaler Richtung mehr oder weniger behindert. Es entstehen dann Normalspannungen, wenn infolge einer Abkühlung das Material erstarrt und seine plastischen Eigenschaften verliert. Hierbei überlagern sich Biegezugspannungen mit Zugspannungen.

Biegezugspannungen entstehen bei der Abkühlung von der Belagsoberfläche her, also bei einseitiger Abkühlung dadurch, daß sich auf Grund des Temperaturgefälles im Querschnitt die obere Faser mehr zusammenzieht als die untere, die daraus resultierende Aufwölbung aber durch das Eigengewicht des Belages und damit durch seine Einspannung in einem größeren Flächenstück verhindert wird. Wird die in der oberen Faser auftretende Biegezugspannung größer als die Biegezugfestigkeit des Materials, so reißt der Belag an der Oberfläche. Je nach dem Grad der Abkühlung und nach der Beschaffenheit und den Eigenschaften des Materials wird der Riß sich von der Oberfläche her nach unten fortsetzen.

Zugspannungen entstehen durch einen auf den gesamten Querschnitt einwirkenden Temperaturabfall, also dann, wenn sich alle Fasern des Querschnitts gleichmäßig abkühlen. Das Material wird dann bei Überschreiten der Zugfestigkeitsgrenze schlagartig über den ganzen Querschnitt reißen. Auf Grund des Temperaturabfalls hat der Belag das Bestreben, sich in horizontaler Richtung zusammenzuziehen. Verhindert wird die Zusammenziehung eines Flächenteilchens durch dessen Einspannung in einer Fläche von größerer Ausdehnung. Das Bestreben, sich zusammenzuziehen, erzeugt zwischen dem Belag und dem Unterbau eine Reibungskraft, die vom Eigengewicht des Belages und vom Reibungskoeffizienten zwischen Belag und Unterbau abhängig ist. Ist die Reibungskraft größer als die Kraft, die die Teilchen des Asphaltes zusammenhält, so tritt der Riß ein.

Überlagern sich beide Fälle, also Biegezug- und Zugspannungen, so tritt an der Oberfläche des Belages die größte Zugspannung auf. Diese kann sich zuerst durch Bildung von feinen Oberflächenrissen abbauen. Ist der Belag jedoch genügend durchgekühlt, so werden sich diese Oberflächenrisse weiter nach unten fortpflanzen, bis schließlich der Riß, die Unterseite des Belages erreicht. Durch den Riß ist das Material entlastet, die Spannungen sind abgebaut. Mit welcher Geschwindigkeit sich der Riß im Querschnitt fortpflanzt, hängt von den Materialeigenschaften und den äußeren Einflüssen wie

Temperaturabfall und Reibung auf dem Untergrund sowie von der Dicke des Belages ab. Ist der gesamte Querschnitt Spannungen unterworfen, die so groß sind, daß eine Überschreitung der Zugfestigkeit kurz bevorsteht, so kann die Bildung eines Oberflächenrisses zum schlagartigen Riß über den gesamten Belagsquerschnitt führen.

Beim Abkühlungsvorgang wird der bei höheren Temperaturen noch weitgehend plastische Baustoff diese plastischen Eigenschaften langsam verlieren und immer starrer werden. Das heißt, der elastische Verformungsanteil gewinnt bei Einwirken irgendeiner Kraft gegenüber dem plastischen an Bedeutung. Bei einer bestimmten Temperatur ist der Asphalt dann so starr, daß eine plastische Verformung fast überhaupt nicht mehr eintritt. Ist der plastische Verformungsanteil gegenüber dem elastischen vernachlässigbar gering, so werden auftretende Spannungen und Verformungen nach dem Gesetz von Hooke in einem linearen Verhältnis zueinander stehen. Hier können dann die Spannungen berechnet werden, wenn Längenänderung und Elastizitätsmodul bekannt sind. Es kommt also darauf an, diese beiden Werte experimentell zu bestimmen. Das Problematische bei dieser Berechnung liegt darin, daß plastische und elastische Verformungen nebeneinander auftreten und daß der Zeitpunkt bzw. die Temperatur, von der ab die Annahme des Hooke'schen Gesetzes für Asphalt Gültigkeit hat, nicht eindeutig festzulegen sind.

Um annäherungsweise die auftretenden Kräfte zu ermitteln, sind erst einmal für verschiedene Asphalte die folgenden Eigenschaften bestimmt worden:

- (a) der Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperatur. Diese Abhängigkeit ist unbedingt zu berücksichtigen, wenn eine Berechnung der Zusammenziehung während des Abkühlvorganges, also der Längenänderung des Prüfstoffes vorgenommen werden soll. Wie später gezeigt werden wird, ändert sich der Ausdehnungskoeffizient mit fallender Temperatur erheblich.
- (b) der Elastizitätsmodul. Seine Bestimmung wird über das elastische Verhalten von Asphalten Auskunft ge-

ben. Mit Hilfe des Ausdehnungskoeffizienten und des Elastizitätsmoduls sollen dann die Spannungsrechnungen in Temperaturbereichen durchgeführt werden, in denen der Asphalt hauptsächlich nur elastische Eigenschaften besitzt.

- (c) Abgrenzung des plastischen Verformungsbereichs gegenüber dem elastischen. Daraus kann beurteilt werden, wie lange ein Asphalt bei Abkühlung die entstehenden Spannungen durch Fließen wieder abzubauen in der Lage ist und wann die Formänderungen durch seine elastischen Eigenschaften bestimmt werden.
- (d) Um die bei Abkühlung von der Oberfläche her im Querschnitt auftretenden Temperaturen auch rechnerisch verfolgen zu können, sind ferner die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärme erforderlich.

Darüber hinaus wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem Prüfbeläge unter bestimmten Bedingungen zum Reißen gebracht werden können. Diese Bedingungen müssen den tatsächlichen Verhältnissen in der Natur möglichst nahe kommen und im Labor erzeugt werden können. Die dazu entwickelte Prüfmethode ist in dieser Arbeit beschrieben. Sie führte zu gut reproduzierbaren Ergebnissen, nach denen an verschiedenen Asphaltmischungen Zeitpunkt und Art der Rißbildung festgestellt werden konnten. Aus dem Vergleich dieser Ergebnisse sind in einer zusammenfassenden Beurteilung Schlüsse gezogen, wie Eigenschaften und Zusammensetzung das Rißverhalten von Gußasphalt- und Mastixbelägen beeinflussen.

2. Frühere Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens von Asphalten bei tiefen Temperaturen

In diesem Abschnitt werden einige der bekannt gewordenen Untersuchungsmethoden und - ergebnisse besprochen, die sich unmittelbar oder mittelbar mit der Frage der Rißbildung befassen oder mit den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen oder erörterten Problemen in einem Zusammenhang stehen.

Fischer (1) behandelte Probleme der Rißbildung durch Berechnung des Spannungsverlaufes in dünnen, plattenförmigen Körpern unter Einwirkung einer Schrumpfung in Abhängigkeit von der Wechselwirkung zwischen Belag und Untergrund. Untersucht wurden Biegezug-, Zug- und Druckfestigkeiten, Elastizitätsmodul, Haftfestigkeit, Wärmedehnzahl und Einfluß einer Armierung des Gußasphaltes. Aus diesen Werten bestimmte Fischer mit den von ihm entwickelten Rechenmethoden die vermutlichen Rißabstände. Die Werte wurden festgestellt für Temperaturen von +20 bis -10°C. Der Elastizitätsmodul, in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen und aus den Ergebnissen von Biegezugprüfungen ermittelt, kann in dem vorliegenden Temperaturbereich nicht als ein Maß für die elastische Dehnung zur Ermittlung der rechnerischen Spannungen eingesetzt werden, da das Dehnmaß, aus dem er errechnet wurde, bei diesen Temperaturen hauptsächlich plastische Verformungen wiedergibt. Ferner stehen die Versuchsergebnisse für die Wärmedehnzahl (Ausdehnungskoeffizient) in Abhängigkeit von der Temperatur im Widerspruch zu den in dieser Arbeit und durch Heilporn (2) ermittelten Werten; die Wärmedehnzahl wächst nach Fischer mit fallender Temperatur.

Herrmann (3) führte nach dem besonders kalten Winter 1928/29, in dem Lufttemperaturen bis zu -32°C gemessen wurden, Untersuchungen an einer Reihe von Straßengußasphalten durch, um die Gründe ihrer Rißempfindlichkeit festzustellen. Dazu wurden die Zugfestigkeit und die Dehnbarkeit bei + 22 und bei $\pm 0^{\circ}\text{C}$ gemessen und das Produkt aus beiden, das Arbeitsvermögen, als Wertmesser für das mechanische Verhalten angesehen. Ferner wurden

die Bitumenbeschaffenheit, die Füllermenge und die Dicke der aufliegenden Bitumenschicht ermittelt. Unter der Voraussetzung, daß sich das Bitumen durch den Kochprozeß nicht verhärtet hatte, ergab sich, daß die Rißsicherheit mit fallendem Gehalt an Überschußbitumen und sinkenden Hohlräumen der Mineralmasse, mit steigendem Füllergehalt, also mit wachsender Obeffläche der Mineralmasse und fallender Dicke der Bitumenschicht zunimmt. Neben den Eigenschaften des Bitumens ist also größter Wert auf den richtigen Aufbau der Mineralmasse zu legen, um für die richtige dünnsschichtige Bitumenverteilung zu sorgen.

Rader (4) führte u.a. Biegeversuche bei -57° C durch, um die Rißneigung von Asphaltbelägen verschiedener Zusammensetzung bei tiefen Temperaturen zu untersuchen. Aus der Biegeverformung wurde der Elastizitätsmodul bestimmt und die Bruchfestigkeit und ein sogenannter Bruchmodul festgestellt. Bei den aus der Messung der Verformung festgestellten Werten des Elastizitätsmoduls scheint es sich jedoch mehr um die Messung einer plastischen Verformung gehandelt zu haben, da nicht nachgewiesen wurde, daß bei Fortnahme der Belastung die Formänderung voll wieder zurückgeht.

Rader kommt zu dem Schluß, daß die Rißsicherheit umso größer ist, je kleiner der E-Modul und je größer die Bruchfestigkeit ist. Die in Abschnitt 6 dieser Arbeit aufgeführten Ergebnisse zeigen, daß dieser Schluß zumindest problematisch ist.

Hallberg und Lindholm (5) führten im staatlichen Straßeninstitut Stockholm Versuche durch, bei denen Risse in Gußasphalten erstmalig nur durch Abkühlung erzeugt wurden. Sie legten Asphaltringe um einen Keramikern und kühlten sie ab. Infolge verschiedener Ausdehnungskoeffizienten von Asphaltring und Kern riß der Ring. Bei Straßen- gußasphalten normaler Zusammensetzung traten die Risse bei -32 bis -42° C auf. Der Mittelwert lag etwa bei -38° C.

Heilporn (2) beschäftigte sich ebenfalls mit der Frage der Rißneigung verschiedener Bitumen- und Mastixsorten. Er führte u.a. Messungen des Ausdehnungskoeffizienten

in einem Dilatometer in Abhängigkeit von der Temperatur durch. Er fand folgende charakteristische Kurve (Abb.1):

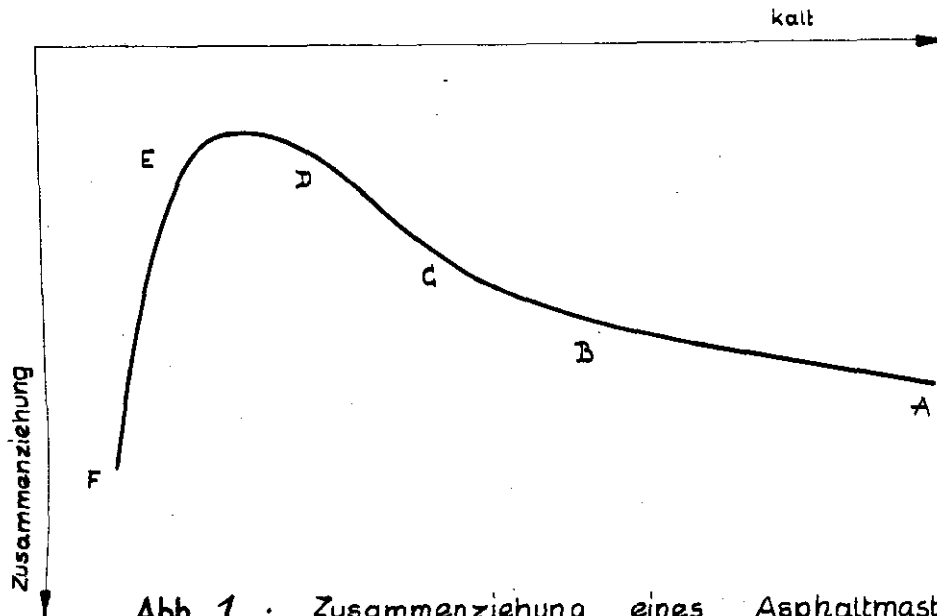


Abb. 1 : Zusammenziehung eines Asphaltmastix
in Abhängigkeit von der Temperatur
nach L. Heilporn

Hierin bedeuten:

- AB = Zone, in der der Ausdehnungskoeffizient klein ist. Sie entspricht einem bestimmten Zustand, der einem Zustand des Glases analog ist (glasige Zone gemäß der nachfolgenden Einteilung)
- BC = Kurve, die einer fortschreitenden Veränderung des Ausdehnungskoeffizienten entspricht, die schließlich zu einer Vergrößerung führt.
- CD = Zone, in der der Ausdehnungskoeffizient größer ist also vorher. Er ist fast konstant, jedoch vergrößert er sich im allgemeinen ein wenig mit der Temperatur.
- DE = oberster Kurventeil. In diesem Augenblick ist das bituminöse Bindemittel, der geschmeidige Teil des Mastix, genügend viskos, so daß die Federkraft, mit der der Taststab der Meßeinrichtung gegen den Prüfkörper drückt, die Verlängerung aufhebt.
- EF = Zone, in der die Federkraft des Taststabes den Widerstand des Mastix überwindet.

Heilporn unterscheidet zwischen 2 Zuständen, dem viskosen und dem glasigen Zustand, und stellt 3 Zonen heraus, die viskose Zone (phase visqueuse)
Zone der Verglasung (zone de vitrification)
glasige Zone (phase vitreuse)

Aus den Ergebnissen wird nun geschlossen, daß die zwischen der viskosen und der glasigen Phase liegende Zone der Verglasung die für die Rißbildung gefährlichste ist, da in diesem Moment die äußeren Spannungen nicht mehr abgebaut werden können und innere Spannungen entstehen, weil im mikroskopischen Zustand Teilchen aneinander stoßen, die sich einerseits schon in der glasigen und andererseits noch in der viskosen Phase befinden und die einen unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Von dieser Theorie wird angenommen, daß sie die Frage der Rißneigung zu erklären erlaubt. Ein Kriterium für die Rißbildung ist demnach das Vorhandensein der Krümmung BC in der Kurve, die Größe der Krümmung und deren Lage in Bezug auf die Temperaturhöhe. Die Änderung im Zustand ließ sich jedoch nicht immer einwandfrei nachweisen, so daß weitere Ergebnisse abzuwarten wären.

Die festgestellte Temperaturabhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten ist zweifellos wichtig bei der Beurteilung des Verhaltens von Gußasphalten bei tiefen Temperaturen, sie bestätigt das im Rahmen dieser Arbeit gefundene Verhalten. Die Rißneigung jedoch allein oder zumindest im überwiegenden Maße mit der Veränderung des Ausdehnungskoeffizienten zu begründen, erscheint bei der Vielzahl der einwirkenden Faktoren ungerechtfertigt, insbesondere als kaum ein Vergleich zur Praxis vorliegt bzw. an den untersuchten Materialien auf irgendeinem Wege Risse nicht erzeugt worden sind.

3. Wahl der Prüfbedingungen

Maßgebend für die Wahl der Prüfbedingungen sind zuerst die in unseren Breiten vorkommenden tiefsten Temperaturen. Diese können in kalten Wintern -25 bis -30°C betragen. Gemessen wurde in Basel schon eine Temperatur von $-37,5^{\circ}\text{C}$,

Zu berücksichtigen ist bei diesen Angaben, daß als Lufttemperatur die Temperatur in 2 m Höhe über dem Erdboden angegeben wird, während die Temperatur in der Bodenoberfläche bei bestimmten Witterungsbedingungen erheblich niedriger liegt.

Hallberg und Lindholm (5) geben an, daß die Temperaturen der Straßenoberfläche mehrere Grade unter der Lufttemperatur liegen kann. Wegen Ausstrahlung von Wärme in klaren Frostnächten wurde bis zu 8°C Untertemperatur gegenüber der Lufttemperatur gemessen. Außerdem kann sich eine Untertemperatur infolge Ansammlung kalter Luft in Vertiefungen der Erdoberfläche ergeben. Kälteseen in den Niederungen zeigen 10 bis 12°C niedrigere Temperaturen als sie zur gleichen Zeit auf der Höhe herrschen. So kann, wenn die meteorologisch aufgezeichnete Lufttemperatur -35°C beträgt, die Belagstemperatur etwa -50°C betragen.

Lund (6) gibt an, daß in klaren Nächten auf Dachoberflächen Oberflächentemperaturen entstehen können, die 5,5 bis $7,7^{\circ}\text{C}$ unterhalb der Temperatur der umgebenden Luft liegen. In bewölkten Nächten treten diese nicht auf, weil die Wolken den Wärmeaustausch unterbrechen.

Geiger (7) gibt die tiefste in Mitteleuropa gemessene Temperatur im Winter 1928/29 mit -48°C an; in einem Tal sollen sogar -51 gemessen worden sein. Nach Geiger reicht der Einfluß der tageszeitlichen Temperaturänderungen nur bis ungefähr 10 cm Bodentiefe.

Aus diesem Grunde und um Versuchsbedingungen zu schaffen, unter denen auch im Labor eine Wirkung auf die untersuchten Asphaltmassen erzielt werden kann, sind bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen extreme Temperaturen bis zu -50°C angewendet worden.

Risse in der Natur werden bei Asphaltbelägen besonders bei extremen Temperaturstürzen auftreten. Da die hierbei auftretenden Abkühlungsgeschwindigkeiten für Versuche im Labor zu gering sind, mußten größere Kühlgeschwindigkeiten gewählt werden.

Als Kühlmittel diente Alkohol, dem feste Kohlensäure zugesetzt wurde. Durch Zugabe in geringen Mengen, in kleinen Stücken oder zu Pulver zerstampft, konnte die gewünschte Temperatur auf $\pm 0,5^{\circ} \text{C}$ gehalten werden.

4. Verwendete Materialien

4.1 Auswahl der Materialien

An Materialien wurden einmal verschiedene Naturasphaltmastix-Sorten geprüft, da in diesen ein Material mit gleichbleibenden Eigenschaften und gleichbleibender Zusammensetzung zur Verfügung stand, an dem der Einfluß von Bitumengehalt und Erweichungspunkt des Bitumens bzw. dessen Eindringungstiefe untersucht werden konnte. Weiterhin wurden 3 Straßengußasphalte, 1 Fußbodenbelag und 2 Dachmastixes untersucht, die z.T. im Labor hergestellte Mischungen darstellten.

- | | |
|------------------------------------|----------------|
| 1. Naturasphalt-Hartmastix 12 % | (H 12) |
| 2. Naturasphalt-Hartmastix 16 % | (H 16) |
| 3. Naturasphalt-Isoliermastix 16 % | (J 16) |
| 4. Naturasphalt-Isoliermastix 22 % | (J 22) |
| 5. Hartgußasphalt "Avola-Mastifix" | (Avola) |
| 6. Straßengußasphalt I | (Str.G.A.I) |
| 7. Straßengußasphalt II | (Str.G.A.II) |
| 8. Straßengußasphalt III | (Str.G.A.III) |
| 9. Dachmastix I | (Dachm. I) |
| 10. Dachmastix II | (Dachm.II) |

Die Sorten 1 bis 5 sind Mastix-Sorten, die von der Naturasphaltindustrie in Broten geliefert werden. "Avola-Mastifix" (Firmenbezeichnung) ist dabei ein fertiger Gußasphalt, der als Unterboden für Fußbodengehschichten oder als schwimmender Asphaltestrich auf Dämmschichten verlegt Verwendung findet. Die Straßengußasphalte I und II sind Gußasphalte, die in Braunschweig im Jahre

1952 als obere Schicht eines Straßenbelages für Stadtstraßen verlegt worden sind. Sie wurden direkt aus den Kochern entnommen. Straßengußasphalt III ist im Labor nach einem von Martin/Neumann (8) angegebenen Rezept für Straßengußasphalte, Dachmastix nach den britischen Vorschriften (9) hergestellt. Die Rezepte für Straßengußasphalt III und Dachmastix I sind aus Anlage 1 zu entnehmen. Dachmastix II ist ein Dachbelag, der mehrere Jahre auf einem Flachdach eines großen Fabrikgebäudes in München gelegen hat und im Winter 1952/53 plötzlich zahlreiche und völlig unregelmäßige Risse aufwies.

4.2 Besondere Bestimmungen

Die nach Durchführung der Versuche festgestellte Zusammensetzung der Asphaltmassen und die Eigenschaften derselben und des Bindemittels sind in der Anlage 2 zusammengefaßt.

Diese Angaben beschränken sich nicht nur auf die in Deutschland üblichen Prüfmethode; es wurde vielmehr auch die Härtezahl nach Wilson, die im Ausland anstelle der Eindringtiefe nach DIN 1996 festgestellt wird, wie u.a. in Belgien und Großbritannien, sowie der Penetrationsindex P.I. des Bindemittels nach Pfeiffer/van Doormaal (10) angegeben.

Die Härtezahl soll einen Vergleich der Eigenschaften des Dachmastix I mit den für einen solchen nach den englischen Vorschriften geforderten Eigenschaften ermöglichen, da hierfür in Deutschland keine besonderen Bestimmungen bestehen. Die englischen Vorschriften fordern für einen Dachbelag unter Verwendung von Naturasphalt bei 25° C eine Härtezahl von ≥ 40 , während die belgischen Vorschriften bestimmen, daß für Dachbeläge mit horizontalen Dachflächen und solche mit Neigungen bis zu 10% die Härtezahl bei 25° C zwischen 30 und 80 liegen soll. Die Härtezahl des Dachmastix II erfüllt beide Forderungen nicht.

4.3 Herstellung der Prüfkörper

Da es sich bei ^{den}verwendeten Materialien ausschließlich um Gußasphalt und Asphaltmastix handelt, interessiert nur die Angabe der Temperatur der Massen bei der Herstellung der Prüfkörper. Sie betrug für:

J 22	160° C
J 16	170° C
H 16, Dachm. I und II	180° C
H 12 und Avola	190° C
Str.G.A. I, II und III	200° C

Die Massen wurden bei dieser Temperatur in die ebenfalls auf diese Temperatur vorgewärmten Stahlformen gegossen und mit einem Streichfett oder Spachtel verstrichen und geglättet. Die Stahlformen waren vorher leicht mit einer Mischung aus Glycerin und Kalkmehl überstrichen, um ein Haften der Asphaltmasse zu verhindern. Nach dem völligen Erkalten wurden die Prüfkörper der Form entnommen und an der Luft bei Zimmertemperatur gelagert.

Zur Verwendung kamen Stahlformen für folgende Prismen- und Würfelgrößen:

4 cm x 4 cm x 16 cm
4 cm x 4 cm x 30 cm
4 cm x 4 cm x 26 mit verbreiterten Stabköpfen (Zugkörper)
7 cm x 7 cm x 7 cm

Die Prüfbeläge 50 cm x 20 cm x 4 cm wurden in einer Holzschalung, die Prüfkörper für die Bestimmung der Wärmeleitzahl und spezifischen Wärme mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Dicke von 2 cm in einer Holzform hergestellt.

5. Versuche zur Bestimmung einiger Eigenschaften von Asphaltmischungen bei verschiedenen tiefen Temperaturen

5.1 Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperatur

5.11 Allgemeines

In der Literatur findet sich eine ganze Reihe von Angaben über den Ausdehnungskoeffizienten von Asphalten verschiedener Zusammensetzung. Gemessen wurden kubischer sowie linearer Ausdehnungskoeffizient. Da hier mit Hilfe des Ausdehnungskoeffizienten lediglich eine Längenänderung bestimmt werden soll, genügt der lineare.

Herrmann (11) gibt ihn für Stampf-, Guß- und Walzasphalte und Teerbeton für Mischungen mit unterschiedlichem Bindemittelgehalt und Bindemittelüberschuß über die Hohlräume zwischen 0,0000 13 und 0,0000 49 liegend an.

Saæl (12) hat festgestellt, daß der kubische Ausdehnungskoeffizient für Bitumensorten verschiedenster Herkunft und unterschiedlicher Penetration und Erweichungspunkte ziemlich gleichbleibend zwischen 0,000 60 und 0,000 62 liegt.

Danach kann sich der Ausdehnungskoeffizient von Asphalten verschiedener Zusammensetzung nur in Abhängigkeit von Bindemittelgehalt und von der Kornzusammensetzung und Art der Mineralmasse verändern. Für die beiden Mastixsorten H 16 und J 16 müßte er also wegen der gleichen Kornzusammensetzung und des gleichen Bindemittelgehaltes theoretisch den gleichen Wert ergeben.

Da die Probleme im Rahmen dieser Arbeit bei tiefen Temperaturen und bei Abkühlung auf tiefe Temperaturen untersucht werden sollen, ist hier auch die Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten von der Temperatur zu untersuchen.

5.12 Versuchsdurchführung

In Prismen von 30 cm x 4 cm x 4 cm Größe wurden Meßzapfen im Abstand von 25,34 cm (= 10 Zoll) eingebaut. Der Einbau fand sofort bei der Herstellung der Prismen statt. Dabei hielt ein Abstandshalter die in den noch heißen und plastischen Asphalt hineingedrückten Meßzapfen während des Erkaltens der Asphaltmasse in der richtigen Lage. Die Messung des Abstandes zwischen diesen beiden Meßzapfen (s. Anlage 64, oberes Bild) erfolgte mit dem Deformeter der Fa. Huggenberger, Zürich (Meßstrecke 10"), und zwar jeweils nach Erreichen einer bestimmten Abkühlungsstufe. Diese Abkühlungsstufen lagen 10° C auseinander. Zur Feststellung, ob die gewünschte Temperatur im Querschnitt erreicht worden war, waren gleichmäßig über den Querschnitt verteilte Thermoelemente zur laufenden Verfolgung der Temperatur eingebaut. Die Messung fand erst statt, nachdem im ganzen Querschnitt die gleiche Temperatur herrschte. Dieser Zustand war nach etwa 8 bis 12 Minuten erreicht. Um die durch den Einbau der Thermoelemente hervorgerufene Querschnittschwächung zu vermeiden und um die Versuchsdurchführung einfacher zu gestalten, wurde auf den Einbau der Thermoelemente nach den ersten Tastversuchen verzichtet und bei jeder Abkühlungsstufe die Temperatur vor der Messung gleichbleibend 15 Minuten lang gehalten.

5.13 Ergebnisse

Je Mischung und Temperaturbereich wurden 5 Versuche durchgeführt. Die Mittel daraus ergaben Kurven, wie sie in Anlage 3 bis 5 für alle Mischungen aufgezeichnet sind. Die Zahlenwerte sind in Zahlentafel 1 zusammengestellt.

Ausdehnungskoeffizient α in Abhängigkeit von der Temperatur

Z a h l e n t a f e l 1

Material	Ausdehnungskoeffizient $\alpha \cdot 10^{-6}$ für den						
	Temperaturbereich (°C)						
	$\frac{+10}{+0}$	$\frac{+0}{-10}$	$\frac{-10}{-20}$	$\frac{-20}{-30}$	$\frac{-30}{-40}$	$\frac{-40}{-50}$	$\frac{-50}{-60}$
H 12	65	54,5	45	36,5	29	23,5	19,5
H 16	71	59,5	49	40	31,5	26	21,5
J 16	76	62,5	51,5	41,5	33,5	27	22,5
J 22	97	80,5	65	51	38,5	28,5	21
Avola	53	43,5	36	29,5	26	18,5	14,5
Str.Ga.I	41	35	29,5	25	21	18	15
Str.GA.II	50	42,5	35,5	28,5	23	18,5	14
Str.GA.III	43	36,5	31	26,5	23,5	21	19,5
Dachm. I	65,5	54,5	44,5	35,5	27	20	13,5
Dachm. II	80	66	54	43	34	26,5	20

Größtenteils unabhängig von der jeweils herrschenden Temperatur haben die bitumenreichen Mischungen einen größeren Ausdehnungskoeffizienten als die bitumenärmeren (J 22/J 16, H 16/H 12 und Str.GA.II/I). Für Mischungen mit gleichem Bitumengehalt, aber unterschiedlichem Erweichungspunkt des Bindemittels, fällt der Ausdehnungskoeffizient geringfügig mit steigendem Erweichungspunkt (J 16/H 16). Diese Feststellung widerspricht der unter 'Allgemeines' zitierten Literaturangabe von Saal. Der Unterschied im Ausdehnungskoeffizienten zwischen J 16 und H 16 ist jedoch so gering, daß er auch mit dem etwas unterschiedlichen Kornaufbau der beiden Mineralmassen

erklärt werden kann.

Trotz annähernd gleichen Bitumengehaltes und gleicher Erweichungspunkte zeigen Str.GA.II und III ein unterschiedliches Verhalten. Der Füllergehalt des Str.GA. III liegt mit 27,5 % höher als bei Str.GA II mit 21 %. Mischung III ist dadurch stabiler als II, was sich auch in der niedrigeren Eindringtiefe ausdrückt. Da Str.GA. III zumindest im Temperaturbereich herunter bis zu -30°C einen geringeren Ausdehnungskoeffizienten aufweist, ist zu schließen, daß ein höherer Füllergehalt bei einer Asphaltmischung mit gleichem Bindemittelgehalt eine Verringerung des Ausdehnungskoeffizienten bewirkt.

Dachmastix I und II unterscheiden sich sowohl im Bindemittelgehalt und den Eigenschaften des Bindemittels wie auch in der Kornzusammensetzung des Mineralanteils. In Übereinstimmung mit dem bei den Mastixsorten gefundenen Verhalten ist der Ausdehnungskoeffizient für den Dachmastix mit dem geringeren Bindemittelgehalt (Dachm. I mit 13,2 %) kleiner als für den bindemittelreicheren (Dachm. II mit 15,6 %). Der höhere Füllergehalt bei Dachmastix I verstärkt nach dem oben für Str.GA II und III Gesagten noch den Unterschied, d.h. er setzt den Ausdehnungskoeffizienten herab.

Die Größe des Ausdehnungskoeffizienten und seine Abhängigkeit von der Temperatur werden also im Wesentlichen beeinflußt durch:

- (a) Bindemittelmenge und
- (b) Kornzusammensetzung (Fülleranteil)

5.2 Wärmeleitzahl und spezifische Wärme

5.21 Allgemeines

Für einen Teil der untersuchten Materialien wurden Wärmeleitzahl λ und spezifische Wärme c bestimmt, um den Temperaturverlauf im Querschnitt eines Asphaltbelages auch rechnerisch verfolgen zu können. Die Berechnung ist nach einer von Geiger (7) angegebenen Formel möglich. Danach findet man die Abschwächung der Temperaturwelle

aus folgender Beziehung:

ist der Unterschied zwischen dem Höchst- und Tiefstwert der Temperatur in der Tiefe x_1 gleich δ_1 , in der Tiefe x_2 gleich δ_2 , so gilt:

$$\delta_2 = \delta_1 \cdot e^{(x_1 - x_2) \sqrt{\frac{H \cdot \rho \cdot c}{T \cdot \lambda}}}$$

Darin ist:

λ = Temperaturleitzahl in kcal/m·h·°C

c = spezifische Wärme in kcal/kg·°C

ρ = Rauegewicht in kg/m³

T = Schwingungsperiode der Wärmewelle in Stunden

Die Wärmeleitzahl von Bitumen allein liegt nach Saal (12) bei 0 °C zwischen 0,12 und 0,15 kcal/m·h·°C; sie nimmt mit fallender Temperatur ab, und zwar um etwa 15% innerhalb eines Temperaturbereichs von 100° C. Die Unterschiede bei verschiedenen Bitumensorten sind gering und können in der Praxis vernachlässigt werden. Für Mineralien hat λ einen Wert zwischen 1 und 2 kcal/m·h·°C, doch kann er z.B. bei Quarz bis zu 5 kcal/m·h·°C anwachsen.

Bei Mischungen von Mineralien und Bitumen wird das Bindegemittel also den Wert für λ herabsetzen.

Die spezifische Wärme c von Bitumen allein liegt nach Saal bei 0° C zwischen 0,378 und 0,430 kcal/kg·°C, sie wird mit fallender Temperatur kleiner. Die Änderung ist so gering (zwischen 0,000 32 und 0,000 78 kcal/kg·°C je 1° C), daß sie sich auch bei Temperaturunterschieden von 50° C bei Asphalt höchstens mit 0,01 kcal/kg·°C auswirkt. Für die praktische Berechnung ist diese Temperaturabhängigkeit zu vernachlässigen.

5.22 Versuchsergebnisse

Die Messungen wurden im Wärmetechnischen Institut der Technischen Hochschule Braunschweig an den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Mastixsorten durchgeführt.

Die Bestimmung der Wärmeleitzahlen erfolgte in Abhängigkeit von der Temperatur zwischen $+10$ und $+55^{\circ}\text{C}$. Verwendet wurde die Poensgen-Apparatur, die nach einem von E. Schmidt vorgeschlagenen und im Wärmetechnischen Institut der TH Braunschweig weiterentwickelten Verfahren abgeändert worden war.

Gemessene Wärmeleitzahl λ von 4 verschiedenen
Naturasphaltnastix-Sorten

Z a h l e n t a f e l 2

Mastix-Sorte	Prüftemperatur in $^{\circ}\text{C}$	Wärmeleitzahl λ in $\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$
H 16	10	0,877
	25	0,861
	40	0,845
	55	0,829
H 12	10	0,900
	25	0,897
	40	0,894
	55	0,891
J 22	18,5	0,725
	25,03	0,681
	31,16	0,643
J 16	20,04	0,837
	31,4	0,818
	50,25	0,785

Unter der Annahme geradlinigen Verlaufs wurden für den Temperaturbereich $+50$ bis -60°C Zwischenwerte interpoliert. Diese sind aus Zahlentafel 3 sowie aus Anlage 6 zu ersehen.

Interpolierte Zwischenwerte der Wärmeleitzahl λ
für den Temperaturbereich +50 bis -60° C

Z a h l e n t a f e l 3

Temperatur in °C	Wärmeleitzahl λ in kcal/m·h·°C für die Mastix-Sorten			
	H 12	H 16	J 16	J 22
+50	0,892	0,834	0,786	0,524
+40	0,894	0,845	0,805	0,588
+30	0,896	0,856	0,821	0,650
+20	0,898	0,867	0,840	0,712
+10	0,900	0,877	0,857	0,775
0	0,902	0,888	0,875	0,838
-10	0,904	0,899	0,893	0,900
-20	0,906	0,909	0,911	0,963
-30	0,908	0,920	0,928	1,025
-40	0,910	0,931	0,946	1,087
-50	0,913	0,942	0,962	1,150
-60	0,915	0,952	0,980	1,212

Spezifische Wärme c bei +22° C

Z a h l e n t a f e l 4

Mastix-Sorte	H 12	H 16	J 16	J 22
spez. Wärme c in kcal/m h° C	0,21	0,22	0,22	0,24

5.23 Besprechung der Ergebnisse

Bei Mischungen mit hohem Bindemittelgehalt wächst das Wärmeleitvermögen mit fallender Temperatur. Das bedeutet, daß die Durchkühlung der oberen Zone bei Abkühlung von der Oberfläche her schneller vor sich geht, als die der unteren Zone. Die Kurve des Temperaturverlaufs im Querschnitt ist dann nach oben durchgebogen (s. Anlage 30).

Mit abnehmendem Bindemittelgehalt verändert sich die Wärmeleitzahl mit der Temperatur immer weniger, bis sie bei H 12 fast konstant bleibt. Die Kurve des Temperaturverlaufs im Querschnitt ist dann nahezu eine Gerade. Sie würde bei unendlich langer Abkühlungsgeschwindigkeit zu einer Geraden werden. (s. Anlage 39)

Zusammenfassend ist zu sagen, daß das Bindemittel trotz seines verhältnismäßig geringen Anteils an der Gesamtmasse einen ausgeprägten Einfluß auf die Wärmeleitzahl von Asphalten ausübt.

5.3 Elastizitätsmodul

5.31 Allgemeines

Unter Elastizität wird die Fähigkeit eines Körpers verstanden, nach einer unter dem Einfluß äußerer Kräfte entstandenen Formänderung die vorher vorhandene Form wieder anzunehmen, wenn die Einwirkung dieser äußeren Kräfte wieder aufgehoben ist.

Beim Asphalt geschieht dies nicht sofort. Unmittelbar nachdem die Einwirkung der äußeren Kräfte aufgehoben und die elastische Formänderung rückgängig gemacht worden ist, ist ein Formänderungsrest festzustellen, der sich in Abhängigkeit von der Zeit anfänglich noch verringert. Diese 'elastische Rückverformung', 'elastische Erholung' (Broome (13)), 'elastische Nachwirkung' (Memmler (14)) oder 'gedämpft-elastische Formänderung' (Seegers (15)) läuft mit der Zeit aus. Es bleibt dann nur noch ein Formänderungsrest übrig, die plastische Formänderung. Die Gesamtformänderung ist demnach zu trennen in:

elastische Formänderung

gedämpft-elastische Formänderung

plastische Formänderung

In diesem Abschnitt soll nur die elastische Formänderung untersucht und in der Form des Elastizitätsmoduls dargestellt werden.

Der Elastizitätsmodul ist schon häufig gemessen worden. Dabei wurden 2 verschiedene Meßmethoden angewendet, nach denen auch die Ergebnisse unterschieden werden sollen: die statische und die dynamische Methode. Der statische E-Modul ist bisher meistens aus Biegezugverformungen bestimmt worden, der dynamische aus Schwingungs- und Torsionsbeanspruchungen. Wie weit diese Werte letzten Endes vergleichbar sind, kann hier nicht näher untersucht werden! Nijboer (16) faßt beide, einen E-Modul aus einer Beanspruchung durch Torsionsschwingungen und einen solchen aus einer Druckprüfung, in einer graphischen Darstellung, die den E-Modul in Abhängigkeit von der Belastungszeit bei 3 verschiedenen Temperaturen angibt, zusammen (Abb. 2)

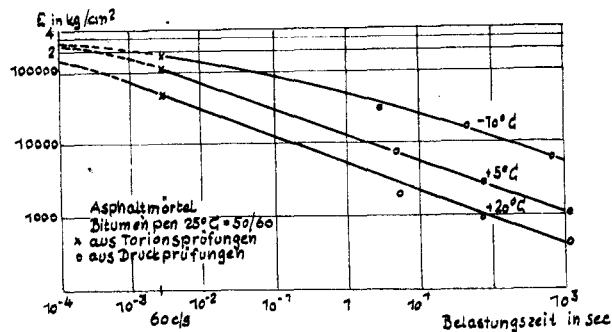


Abb: 2 Elastizitätsmodul als Funktion der Belastungszeit bei verschiedenen Temperaturen (nach Nijboer)

Der Elastizitätsmodul wird bei Asphalten im allgemeinen in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen und angegeben. Die Angabe in Abhängigkeit von der Temperatur ist aber insofern unrichtig, als hierbei die plastische Verformbarkeit des Materials eine Berücksichtigung findet, es sich also eigentlich nicht um eine reine Bestimmung der elastischen Eigenschaften handeln kann. Wenn der Elastizitätsmodul trotzdem immer wieder bestimmt wurde, so nur deshalb, weil er in Ermangelung einer genauen Analyse der komplexen Eigenschaften des Asphaltes zu seiner Charakterisierung benutzt werden sollte. Irgendwelche Spannungsberechnungen mit einem solchen temperaturabhängigen Elastizitätsmoduls werden damit aber sehr problematisch.

Voraussetzung für die Bestimmung eines Elastizitätsmoduls ist, daß die Verformung, der der Probekörper unterworfen wird, sofort nach Entlastung völlig wieder zurückgeht. Die Belastung muß theoretisch in der Zeit Null erfolgen, wenn sich der Probekörper in einem Zustand befindet, in dem er neben elastischen Verformungen auch noch plastische erleiden kann. Die Abhängigkeit von der Temperatur wird damit zu einer Abhängigkeit von der Belastungsdauer.

Da der Elastizitätsmodul nur in dem Temperaturbereich interessiert, in dem der überwiegende Teil der Formänderungen elastischer Natur ist, wurde er im Rahmen dieser Arbeit auch nur in diesem Temperaturbereich gemessen. Es stellte sich dabei heraus, daß er tatsächlich in diesem Bereich von der Temperatur unabhängig und eindeutig meßbar ist, wenn nur die Belastungszeit genügend kurz gehalten wird. Es handelt sich dabei um den Temperaturbereich, in dem die aus der Zusammenziehung durch Abkühlung entstehende Spannung wegen der Starrheit des Stoffes durch plastische Verformungen nicht mehr abgebaut werden kann und also elastische Verformungen hervorruft.

Der Elastizitätsmodul kann nun aus Druck-, Biegezug- oder aus Zugbeanspruchungen bestimmt werden.

Biegezugprüfungen haben nach Lee und Markwick (17) den Nachteil, daß sie eine komplizierte Spannungsverteilung erzeugen, die selbst bei normal elastischem Material unmöglich zufriedenstellend analysiert werden kann. Es wurde gefunden, daß, obwohl der Querschnitt einigermaßen eben blieb, die neutrale Faser eines auf Biegung beanspruchten Balkens sehr nahe der Oberfläche liegt. Da die Verteilung der Kräfte im Querschnitt unbekannt ist, scheint diese Art der Versuchsanordnung für die Erforschung der Wirkung von Kräften auf die Deformation nicht geeignet zu sein.

Gegen die Bestimmung der elastischen Eigenschaften aus Zugbeanspruchungen bestanden versuchsmäßige Bedenken,

weil eine Einspannung eines Prüfkörpers ohne durch diese Einspannung hervorgerufene plastische Verformungen und ohne den daraus sich ergebenden Spannungsabbau nicht durchführbar ist.

Es ist deshalb, um möglichst klare Spannungsverhältnisse zu schaffen, der Elastizitätsmodul aus Druckverformungen ermittelt worden. Die Frage, wieweit die Ergebnisse aus Druck- und Zugprüfungen übereinstimmen, wurde nur in orientierenden Versuchen behandelt (s. Abschnitt 6.7). Bei Nijboer (16) findet sich darüber eine Angabe: danach ist

$$E_{\text{Druck}} = \text{ca. } 1,5 \cdot E_{\text{Zug}}$$

Während beim Zerreiversuch die Grenze, bis zu der Beanspruchungen bzw. der ganze Versuch durchzuführen sind, durch den Bruch selbst gegeben ist, also keiner Festsetzung bedarf, ist bei allen den Versuchsarten, deren Durchführung den Bruch vermeiden muß, also auch bei Elastizittsversuchen, eine solche Festsetzung nötig. Das Spannungs-/Dehnungs-Diagramm von Asphaltmassen weist charakteristische Punkte, wie sie etwa bei Stahl in der Proportionalitäts- oder der Streckgrenze sich darbieten, nicht auf; bei solchen Elastizittsversuchen ist die Höhe der Beanspruchung also willkürlich festzusetzen. Sie darf nicht zu niedrig gewählt werden, um nicht zu einer falschen Beurteilung des elastischen Verhaltens zu kommen, andererseits darf sie nicht zu hoch liegen, damit der Prüfkörper nicht der Gefahr vorztigen Bruchs ausgesetzt ist.

Zur Klärung der Frage, welche Druckspannungen durch das Material noch ohne allzugroße plastische Verformungen aufgenommen werden können und ob sich bei verschiedenen Druckspannungen ein unterschiedlicher Elastizitätsmodul ergibt, wurden in Vorversuchen Spannungen von

2,5, 5, 10, 20 und 40 kg/cm²

aufgebracht. Bei Spannungen zwischen 5 und 40 kg/cm² ergaben sich etwa gleiche Werte, bei 2,5 kg/cm² Belastung war der E-Modul dagegen etwas geringer. Diese Abweichung erklärt sich daraus, daß es schwierig ist, bei einer derartig geringen Verformung (etwa 0,004 mm) mit Meß-

uhren von 0,001 mm Genauigkeit eindeutig diese Verformung meßbar zu machen. Eine Erhöhung der Spannung über 40 kg/cm^2 hinaus schien nicht erforderlich, da die Zugfestigkeit bei einigen orientierenden Versuchen bei Temperaturen bis herunter auf -50° C den Wert von 40 kg/cm^2 nicht überschritt (H 16).

5.32 Versuchsanordnung

Zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls wurden Druckversuche an senkrecht gestellten $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ gro-
ßen Prismen durchgeführt. Die Höhe von 16 cm war erforderlich, um bei Verwendung einer 0,001 mm Meßuhr zu meßbaren Verformungen zu kommen und um für sie einen durch die Reibung an der Ober- und Unterseite möglichst unbeeinflussten Wert zu erhalten. Der Reibungseinfluß kann nach Pfeiffer (B) 0 bis 20% der wahren Druckspannung ausmachen. Der richtige Wert für die Druckspannung wird gefunden, wenn die Spannungstrajektorien geradlinig verlaufen. Dieses ist annähernd erreicht, wenn die Prismen mindestens doppelt so hoch wie breit sind. Im vorliegenden Falle ist das Verhältnis von Breite zu Höhe = 1 : 4.

Zwei Prismen standen im Abstand von 2 cm auf einer Stahlplatte senkrecht nebeneinander und waren mit einer weiteren Stahlplatte abgedeckt, die mit einer konstanten Last belastet werden kann. Die Oberfläche dieser Stahlplatte wurde von 2 Meßuhren von 0,001 mm Meßgenauigkeit berührt, die die senkrechten Verformungen anzeigten. Durch einen Hebel war es möglich, eine Last schnell, jedoch ohne Schlag aufzubringen, sie auf die Prismen einwirken zu lassen und sie ebenso schnell wieder zu entfernen. Beide Stahlplatten, die obere und die untere, waren plan-
geschliffen. Die Untere hatte eine Größe von $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, an ihr war ein Gestänge befestigt, das die Meßuhren trug. Die Größenabmessungen und damit das Gewicht der Stahlplatte war deshalb so gewählt, damit die ganze Versuchseinrichtung, die auf einem vollkommen ebenen Zementfußboden stand, durch evtl. Erschütterungen in der Nähe des Prüfgerätes möglichst unbeein-

fluß bliebe. Auf dieser unteren Stahlplatte stand ein 20 cm hohes Stahlrohr von 18 cm Durchmesser. Es war gegenüber der Grundplatte durch ein weiches Bitumen abgedichtet. Der dadurch entstandene Behälter diente zur Aufnahme der Kühlflüssigkeit. Ein etwa 3 cm dicker Isoliermantel aus Mineralwolle schützte das Stahlrohr gegen übermäßige Wärmezuführung von außen her.

Die obere Stahlplatte war in ihren Abmessungen so gewählt, daß sie auf die darunter stehenden Prismen eine Druckspannung von $0,1 \text{ kg/cm}^2$ ausübte. Diese Belastung ist gegenüber den später aufgebrauchten Lasten so gering, daß sie vernachlässigt werden kann; sie war aber nötig, um mögliche Einflüsse der Umgebung, die sich durch Wackeln oder Zittern auf die Meßuhren auswirken können, auszuschalten.

Die obere Stahlplatte war an den Stellen, auf denen die Fühler der Meßuhren aufsetzten, geglättet, um eine möglichst große Genauigkeit der Meßergebnisse zu erzielen.

(Abb. 3. siehe auch Anlage 65. oben)

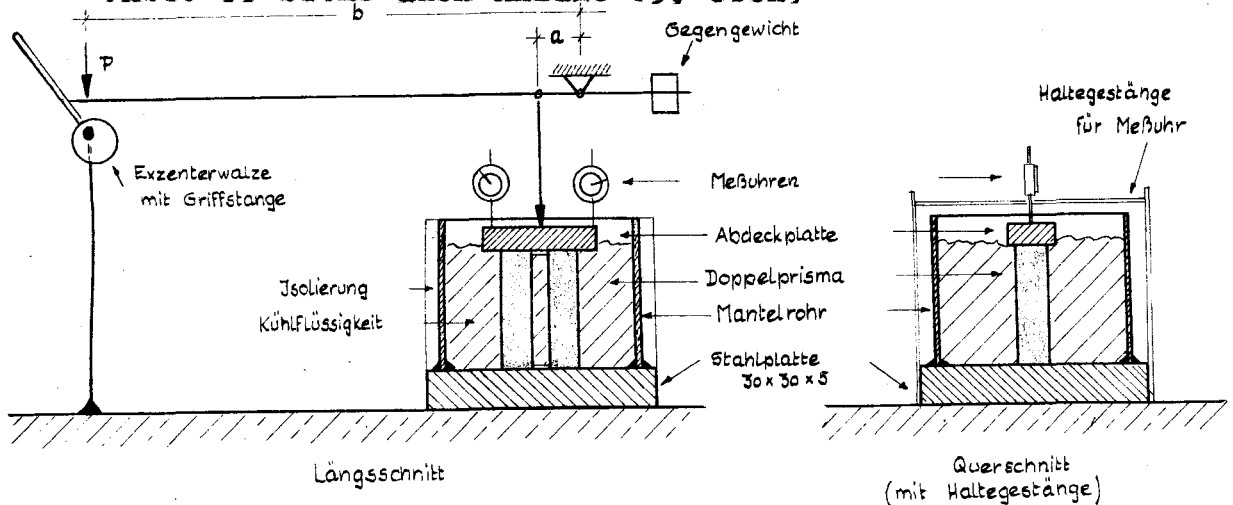


Abb. 3 : Versuchsanordnung zur Bestimmung des E-Moduls

eine gehärtete Stahlkugel zur Druckübertragung besaß, auf die obere Stahlplatte übertragen. Durch eine Hebelarmkonstruktion mit Lastübertragungen im Verhältnis 1 : 5, 1 : 10 und 1 : 20 konnten verschiedene Druckspannungen bis zu 40 kg/cm^2 erzeugt werden. Die Eihrichtung zur Be- und Entlastung der Probekörper sah folgendermaßen aus: am Ende des Hebelarmes unterhalb der Last war

eine abgestützte, exzentrisch gelagerte Stahlwalze drehbar so gelagert, daß sie mit Hilfe einer langen Griffstange um eine Achse gedreht werden konnte. In der einen Extremstellung gab die Walze den Hebelarm frei, so daß die Probekörper belastet wurden, in der anderen hob sie diesen bis zur völligen Entlastung empor. Wegen des großen Durchmessers dieser Stahlwalze von 4 cm konnte die Be- und Entlastung ohne Schlag, jedoch sehr schnell erfolgen. Durch Anbringen eines Gegengewichtes war der Hebelarm so ausbalanciert, daß er in horizontaler Stellung in Ruhestellung stand. Dadurch wurde erreicht, daß lediglich die am Ende des Hebelarmes aufgebraachte Last die Probekörper belastete und damit gewichtsmäßig klare Verhältnisse geschaffen wurden.

Für die Versuchsanordnung wurden deshalb 2 Prismen nebeneinander gestellt, weil sich bei den Vorversuchen herausgestellt hatte, daß die senkrecht stehenden Einzelprismen leicht wackeln, sodaß sich Werte mit ausreichend geringen Fehlergrenzen nicht erzielen ließen. Die 2 Prismen waren, um ihnen eine völlig ebene Anlagefläche gegenüber den beiden Stahlplatten zu geben, mit einer Abgleichmasse abgeglichen und durch diese Abgleichmasse im vorher angegebenen Abstand zusammengehalten. Das saute Aufliegen der Prismen war von besonderer Wichtigkeit, weil die zu erwartenden Druckverformungen nur wenige tausendstel Millimeter betrugen und die geringste Unebenheit zum Hohlstehen oder Wackeln der Prismen geführt und das Meßergebnis in unerträglicher Weise beeinflusst hätte.

Es bereitete gewisse Schwierigkeiten, eine für Asphalt geeignete Abgleichmasse zu finden. Ausprobiert wurden folgende Massen: Zement, Gips, Wasserglas-Talkumkitt und Zinkoxydchlorid-Kitt (19). Die Zementabgleichschicht blätterte nach dem Erhärten vom Gußasphalt wieder ab, bei Gips trat dieselbe Erscheinung auf. Außerdem wurde der Gips nach der Lagerung in der Kühlflüssigkeit (Alkohol) erweicht und quell. Wasserglas-Talkumkitt erhärtete schlecht und erwies sich nicht als widerstandsfähig genug, der Zinkoxydchlorid-Kitt blätterte häufig wieder ab.

Nachdem die Versuche mit allen diesen Abgleichmasse fehlgeschlagen waren, fand sich eine Abgleichmasse aus Schwefelblume, Kaolin und Ruß. Die Masse wird in den staatlichen Prüfanstalten Kopenhagen verwendet und ist wie folgt zu mischen:

2,5	Raumteile	Schwefelblume
1,0	"	Kaolin
0,1	"	Ruß

Die Anteile werden in pulverisiertem Zustand zusammengegeben, kräftig durchgemischt und dann in einem Emaillegefäß zum Schmelzen gebracht. Die Masse läßt sich bei einer bestimmten Temperatur gut vergießen. Die Schmelze wird auf angewärmte Stahlplatten ausgegossen, sodann werden die Probekörper sofort in die noch weiche Schmelze hineingesetzt. Der überstehende Rand kann gleich nach dem Erhärten mit einem heißen Spachtel abgestoßen werden. Die Masse erhärtet nach 10 bis 30 Sekunden und ist nach einer weiteren Stunde Lagerung prüffertig. Sie hat dann eine Druckfestigkeit von etwa 500 kg/cm^2 .

Da sich durch die unterschiedlichen Abkühlungsverhältnisse in der Abgleichmasse an den Stirnflächen der beiden Prismen und im Steg zwischen ihnen Spannungen ergaben, die zu einer leichten Verformung der Anlageflächen führte (konvex oder konkav), mußten die Abgleichflächen unmittelbar vor dem Versuch noch einmal plan geschliffen werden. Das geschah durch Schleifen auf einem auf eine Stahlplatte plan aufgelegten Stück Schmirgelpapier. Zur Kontrolle der Ebenflächigkeit wurde auf die abgeschliffene Fläche zuerst in Längs- und dann in Querrichtung ein Stahllineal aufgelegt und das Doppelprisma gegen das Licht gehalten. Durch etwa zwischen der Abgleichschicht und dem Lineal durchfallendes Licht konnten Unebenheiten, auch von kleinsten Ausmassen, sofort erkannt werden. Das menschliche Auge ist auch für geringste Lichtmengen, die zwischen Prisma und Lineal hindurchfallen, sehr empfindlich. Es war eine Reihe von Vorversuchen nötig, bis alle diese Fehlerquellen erkannt und ausgeschaltet werden konnten.

5.33 Versuchsdurchführung

Die Prüfkörper wurden in einem besonderen Gefäß auf die jeweilige Versuchstemperatur gebracht und dann auf den Boden des Prüfbehälters gestellt. Nach Auflage der Abdeckplatte wurden die Meßuhren befestigt und der Belastungstempel eingerichtet.

Durch Verdrehen der Walze unter dem Hebelarm der Belastungsvorrichtung wurde dieser freigegeben, die Last aufgebracht und nach einer bestimmten Belastungszeit durch erneutes Drehen wieder entfernt. Bei weichen Materialien konnte die Belastungszeit auf Bruchteile einer Sekunde beschränkt werden, etwa $1/5$ bis $1/8$ Sekunde (geschätzt). Bei harten Asphalten und tiefen Temperaturen durfte sie eine Sekunde und mehr betragen, ohne daß in dieser Zeit meßbare Verformungen festzustellen gewesen wären. (s. auch Zahlentafel 5, Anlage 7, Spalten 10 bis 12). Vor Belastung, im Augenblick der Belastung und unmittelbar danach wurden die beiden Meßuhren abgelesen. Nach einer Pause von 30 Sekunden wiederholte sich der Vorgang. In der Zwischenzeit konnte sich eine gedämpft-elastische Formänderung, die evtl. eingetreten war, durch elastische Erholung zurückbilden (s. Zahlentafel 5, Anlage 7, Spalten 13 bis 15).

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls erfolgte bei den Temperaturen

$$\pm 0, -10, -30 \text{ und } -50^{\circ}\text{C.}$$

5 bis 8 an jedem Doppelprisma durchgeführte Belastungen ergaben für die Bestimmung des E-Moduls einen ausreichenden Mittelwert. Bei jeder Temperatur wurden von jeder Asphaltmischung 5 Doppelprismen geprüft.

5.34 Versuchsergebnisse

Die Zahlentafeln 5 und 6 (Anlage 7 und 7a) zeigen an einem Beispiel (Str.GA.III) die Ermittlung der Formänderungswerte und die Mittlung der gefundenen E-Module.

Als mittlere E-Module ergaben sich folgende Werte:

Z a h l e n t a f e l 7

Material	mittlerer E-Modul in kg/cm ²
H 12	62 000
H 16	55 000
J 16	50 000
J 22	44 000
Avola	75 000
Str.GA.I	83 000
Str.GA.II	77 000
Str.GA.III	84 000
Dachm.I	55 000
Dachm.II	61 000

5.35 Besprechung der Ergebnisse

Bei tiefen Temperaturen (-50 und -30° C) sind bei kurzzeitiger Belastung die elastischen von den gedämpft-elastischen und plastischen Verformungen noch klar zu trennen. Das gilt für alle untersuchten Materialien. Bei -10° C ist eine Trennung für die harten Asphalte (H 12, die Straßengußasphalte und Gußasphalt Avola) noch gut, für die weicheren Mischungen (H 16) schon schwieriger durchführbar, für die ganz weichen (J 16, J 22 und Dachmastix I und II) jedoch auch bei kürzester Belastungsdauer nicht mehr einwandfrei möglich. Bei 0° C ist die elastische Verformung für die Straßengußasphalte, H 12 und Avola nur ungenau und für H 16, J 16 und J 22 gar nicht mehr meßbar. Die Belastungsdauer kann hier nicht mehr kurz genug gewählt werden. Hier liegen also die Grenzen der Versuchsanordnung.

Aus der Zahlentafel 5, Anlage 7, Spalten 10 bis 12 ist zu ersehen, daß ganz allgemein die Verformung bei tiefen Temperaturen (-50 und -30° C) fast vollständig zurückgeht. Unmittelbar nach der Entlastung springt der Zeiger der Meßuhr sofort auf den Ausgangswert zurück. Die geringen Schwankungen in der einen oder anderen Richtung (Zahlentafel 5, Anlage 7, Spalten 13 bis 15) gleichen sich über die ganze Versuchsreihe aus. Aus der gleichbleibenden Größe der Verformungen ist zu ersehen, daß bei diesen Temperaturen sich der Elastizitätsmodul auch nach einer Reihe von aufeinanderfolgenden Messungen nicht verändert.

Werden zunächst die verschiedenen Mastix-Sorten untereinander verglichen, so zeigt sich ein Anwachsen des E-Moduls mit abnehmendem Bindemittelgehalt (H 16/H 12 und J 22/J 16) sowie mit steigendem Erweichungspunkt des Bindemittels (J 16/H 16). Die Abstufung der Werte, wie sie sich aus den in 5.34 aufgezeichneten Versuchsergebnissen darstellt, war zu erwarten. Die absolute Größe liegt höher als sie bei den meisten bisherigen, nicht durch Schwingungs- oder Torsionsmessungen gefundenen E-Werten angegeben ist.

Das für den E-Modul der verschiedenen Mastix-Sorten Gesagte gilt im wesentlichen auch für die Straßengußasphalte I und II. Geringerer Bindemittelgehalt und höherer Erweichungspunkt des Bindemittels erhöhen den E-Modul. Straßengußasphalt III bildet insofern eine Ausnahme, als er trotz eines niedrigeren Erweichungspunktes des Bindemittels und eines höheren Bindemittelgehaltes gegenüber Str.GA.I einen höheren E-Modul aufweist. Hier spielt die Kornzusammensetzung des Mineralanteiles eine Rolle. Mit einem erheblich höheren Füllergehalt von 27,5% gegenüber 14,1% ist er stabiler. Eine ähnliche Erscheinung zeigt sich, wenn Avola und Str.GA.II verglichen werden. Die E-Module beider Gußasphalte sind nahezu gleich, doch unterscheiden sich die Mischungen wesentlich in ihrem Bindemittel- und Füllergehalt und in dem Erweichungspunkt des Bindemittels. Trotz des höheren Bitumengehaltes und des größeren Fülleranteils weist Avola ähnliche elastische Eigenschaften auf wie Str.GA. II.

Der Dachmastix I hat den gleichen E-Modul wie der Hartmastix 16 %. Auch in seinen sonstigen Eigenschaften ähnelt er diesem mit nur geringen Abweichungen. Der niedrigere Bindemittelgehalt wird anscheinend durch den tiefer liegenden Bruchpunkt des Bindemittels ausgeglichen. Dachmastix II wiederum ähnelt in E-Modul und Eigenschaften dem Bitumen dem Hartmastix 12 %. Der weitaus größere Gehalt an Bitumen und der kleine Anteil der feinen Korngruppen lassen jedoch in Eindringtiefe und Härtesahl große Unterschiede entstehen.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß Bindemittelgehalt, Härte des Bindemittels und Füllergehalt im Zusammenwirken die Größe des Elastizitätsmoduls und damit die elastischen Eigenschaften beeinflussen. Je kleiner der Bindemittelgehalt, je härter das Bindemittel und je größer der Fülleranteil, desto größer ist der Elastizitätsmodul.

5.4 Abgrenzung des plastischen Verformungsbereichs gegenüber dem elastischen

5.4.1 Allgemeines

Um für Asphalte verschiedener Zusammensetzung bestimmen zu können, wann die aus Abkühlung entstehende Formänderung weitgehend eine elastische ist und ein Abbau der Spannungen durch plastisches Fließen nicht mehr erfolgen kann, ist eine Abgrenzung des plastischen Bereichs gegenüber dem elastischen erforderlich.

Wie bereits in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, setzt sich die Gesamtformänderung eines Asphaltkörpers unter Belastung aus der elastischen, der gedämpft-elastischen und der plastischen Formänderung zusammen. Da der Asphalt ein thermoplastischer Stoff ist, soll hier der Anteil dieser drei Größen an der Gesamtverformung in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht werden, und zwar in dem Temperaturbereich, in dem sich der Übergang vom Bereich weitgehend plastischer Formänderung zum Bereich weitgehend elastischer Formänderung vollzieht.

Die elastische Formänderung tritt im Augenblick der Belastung, die gedämpft-elastische und die plastische Formänderung treten unter Dauerbelastung ein. Die gedämpft-elastische Formänderung bewirkt, daß der unmittelbar nach der Entlastung feststellbare Formänderungsrest sich zum Teil noch weiter abbaut.

Nach Nijboer (16) und Pfeiffer (12) ist die Eigenschaft der gedämpft-elastischen Verformbarkeit des Asphaltes auf den Typ des verwendeten Bindemittels zurückzuführen. Es werden 3 Bitumenarten unterschieden und mit dem Penetrationsindex PI beschrieben. Die Bitumen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Asphalte gehören alle der mittleren Gruppe mit einem PI zwischen -2 und +2 an, sie besitzen also geringe gedämpft-elastische Eigenschaften.

Die Bestimmung der Formänderung soll hier durch Aufstellen einer Verformungskurve in Abhängigkeit von der Temperatur und der Belastungszeit bei konstanter Belastung erfolgen. Diese gestattet eine Trennung der drei Formänderungsanteile (Abb. 4).

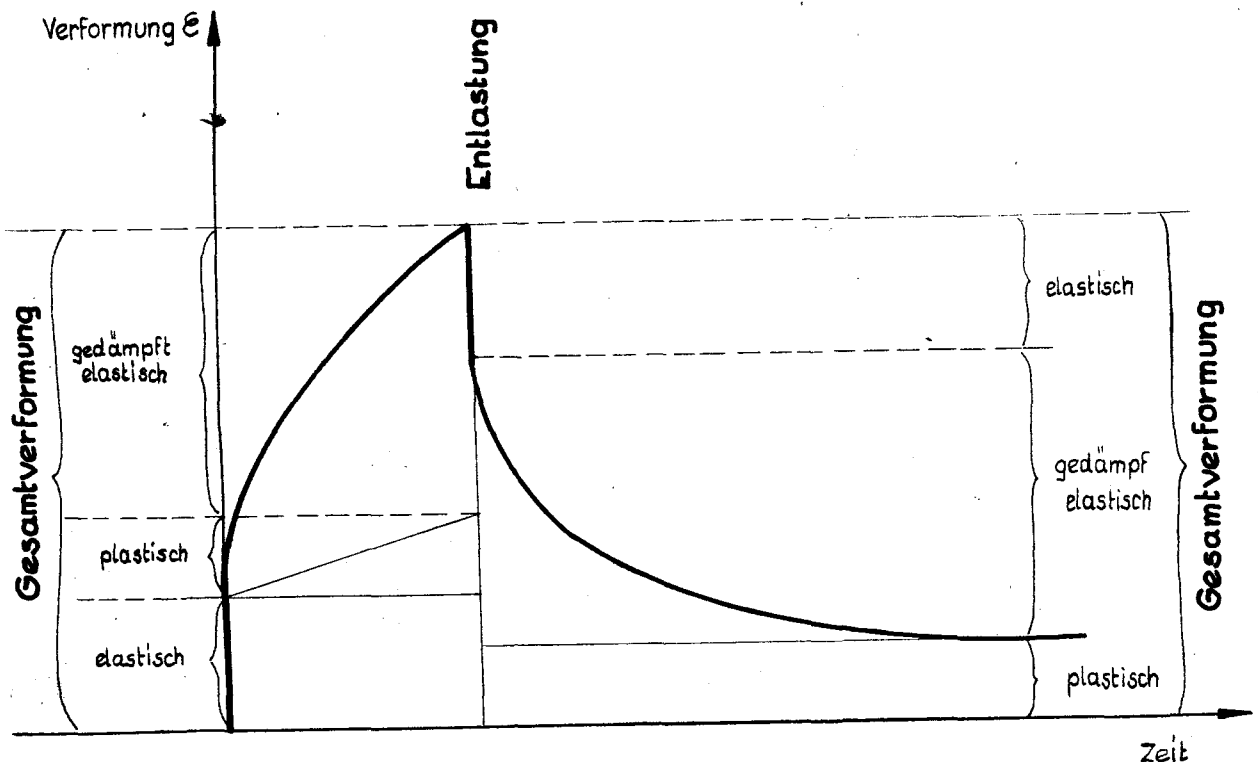


Abb 4 : Verformungsanteile unter einer konstanten Last

5.42 Versuchsanordnung und -durchführung

Die Versuchsanordnung ist die gleiche wie die für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls unter Abschnitt 5.32 beschriebene (Abb.3). Nach der 5 bis 8-maligen kurzzeitigen Belastung wurde dasselbe Doppelprisma zur Aufstellung der Formänderungs-/Zeit-Kurve 5 Minuten lang mit konstantem Druck von 5 kg/cm^2 belastet und mit Hilfe der Meßuhren die Formänderung verfolgt. Dasselbe geschah in den weiteren 5 Minuten nach der Entlastung. Um die anfangs steilen Verformungskurven in ausreichend vielen Punkten zu bestimmen, wurden die Meßuhren in der ersten halben Minute (bei weicheren Materialien in der ersten ganzen) der Belastung und nach der Entlastung alle 10 Sekunden, für den Rest der Zeit alle 30 bis 60 Sekunden abgelesen. Die Belastungs- und Entlastungszeit von je 5 Minuten ist völlig willkürlich gewählt worden. Sie genügte jedoch, um insbesondere bei tieferen Temperaturen ein ausreichendes Bild über den ferneren Kurvenverlauf zu erhalten.

Die weicheren Materialien wie H 16, J 16, J 22 und die Dachmastix-Sorten I und II waren bei den Temperaturen -10 und $\pm 0^\circ \text{ C}$ durch die kurzzeitigen Belastungen zur Feststellung des E-Moduls schon soweit plastisch verformt, daß diese Prismen für die Aufstellung der Formänderungs-/Zeit-Kurven nicht mehr verwendet werden konnten und ausgewechselt werden mußten, damit einwandfreie Meßergebnisse gewährleistet waren.

5.43 Ergebnisse

Die Verformungs-/Zeit-Kurven sind für die einzelnen Materialien in den Anlagen 8 bis 14 aufgezeichnet. Sie stellen die Mittel aus je 5 Messungen dar. Die einzelnen Messungen weichen bis zu höchstens 12%, im allgemeinen aber nicht mehr als 4 bis 5% vom Mittel ab.

Aus dem Kurvenverlauf sind dann die Werte für die 3 Verformungsanteile herausgezogen und in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen worden (Anlagen 15 bis 20).

Dabei wurden die endgültigen Werte für die gedämpft-elastischen und plastischen Verformungen nach der Entlastung für den Zeitpunkt geschätzt, in dem die elastische Erholung ausgelaufen ist und keine Längenänderungen mehr eintreten. Es kann sich hier natürlich für die Temperaturen -10 und $\pm 0^{\circ}$ C nur um einen Näherungswert handeln, da der Endwert erst nach geraumer Zeit erreicht wird; doch geben auch diese Schätzungen schon genügend Auskunft darüber ab, wie sich die einzelnen Formänderungsanteile größenordnungsmäßig gegeneinander verhalten.

Die Größe der elastischen Formänderung ist bei den Temperaturen -10 und $\pm 0^{\circ}$ C in einzelnen Fällen nicht ganz einwandfrei meßbar gewesen, da die Belastung besonders bei den weichen Materialien so schnell zu gedämpft-elastischen und plastischen Formänderungen führte, daß in der Anfangsablesung bereits alle drei Formänderungsanteile enthalten waren. Sie wurden dann mit demselben Wert eingesetzt, der sich bei -30 und -50° C ergeben hatte.

In der Zahlentafel 8 (Anlagen 21 bis 23) sind endlich die verschiedenen Formänderungsanteile in % der Gesamtformänderung für die einzelnen Versuchstemperaturen angegeben. Auch hier wurden die endgültigen Werte für gedämpft-elastische und plastische Formänderung geschätzt.

Da bei J 22 eine Versuchsdurchführung bei $\pm 0^{\circ}$ C ohne hinreichende Genauigkeit nicht mehr durchführbar war, sind die Formänderungsanteile in % der Gesamtformänderung aus dem allgemeinen Kurvenverlauf für $\pm 0^{\circ}$ C geschätzt worden. Diese Werte sind in Klammern angegeben.

5.44 Besprechung der Ergebnisse

Alle untersuchten Materialien zeigen bei -50 und -30°C fast nur elastische und gedämpft-elastische Formänderungen. Die plastische Formänderung ist, vielleicht mit Ausnahme des J 22, diesen gegenüber zu vernachlässigen. Die Verformungs-/Zeit-Kurve nähert sich asymptotisch einer Geraden, deren Steigung den Wert der plastischen Verformung in Abhängigkeit von der Belastungsdauer wiedergibt. Die Gerade liegt bei den Temperaturen -50 und -30°C bei allen Materialien mit Ausnahme des J 22 nahezu, zum Teil sogar völlig horizontal. Der Unterschied zwischen der elastischen Anfangsformänderung und dem Wert nach 5 Minuten Belastungsdauer zeigt also mit guter Annäherung eine rein gedämpft-elastische Formänderung auf, die nach der Entlastung nach wenigen Minuten fast vollständig wieder zurückgeht.

In diesem Bereich werden die durch Abkühlung in das Material hineingebrachten Spannungen nur durch elastische Formänderungen aufgenommen. Aus Ausdehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul können daher Spannungsrechnungen nach dem Hooke'schen Gesetz mit hinreichender Genauigkeit durchgeführt werden.

Gedämpft-elastische und plastische Formänderung wachsen in Abhängigkeit von der Temperatur bis zu 5 Minuten nach der Entlastung in etwa dem gleichen Masse an (s. Anlagen 15 bis 20). Die gedämpft-elastische Formänderung ist dabei gewöhnlich ein wenig größer als die plastische. Die Formänderungsanteile in % der Gesamtformänderung gaben für die einzelnen Materialien besonders für die Temperaturen um -10 und $\pm 0^{\circ}\text{C}$ unterschiedliche Größen (Zahlentafel 8, Anlagen 21 bis 23).

Zu den einzelnen Materialien ist Folgendes zu sagen: Die 4 Mastixsorten zeigen bei steigenden Temperaturen eine Zunahme der Verformungen entsprechend dem Bindemittelgehalt und dem Erweichungspunkt des Bindemittels.

Die elastische Formänderung, die bei Temperaturen zwischen -30 und -50°C 70 bis 80% der Gesamtformänderung ausmacht, fällt mit steigender Temperatur entsprechend der Zunahme der gedämpft-elastischen und plastischen Formänderung bei 0°C auf 20 bis 4% (für H 12 bis J 22).

Die gedämpft-elastische Vorformung steigt von einem Anteil von 12 bis 16% bei -50°C auf einen solchen von 47 bis 76 % bei 0°C (für H 12 bis J 22), die plastische Formänderung wächst wesentlich langsamer an, und zwar von 3 bis 4% bei -50°C auf 30 bis 40% bei 0°C (für H 12 bis J 22). Bei -10°C ist sie noch so groß (16 bis 24%), daß sie den Abbau der Spannungen zulassen wird, während sie bei -30°C schon so gering in ihrem Einfluß ist (4 bis 7%), daß ein umfangreicher Abbau der Spannungen nicht mehr möglich erscheint.

Für die Straßengußasphalte kann das Verhalten unter Druck nicht so eindeutig aus Zusammensetzung und Eigenschaften des Materials erklärt werden, da sie sich in Zusammensetzung und Eigenschaften zu sehr unterscheiden. Str.GA.II erleidet wegen des größten Bindemittelgehaltes die größten Formänderungen und weist bei 0°C mit 38% schon sehr große plastische Verformungsanteile auf. Bei tieferen Temperaturen, also bei -30 bis -50°C zeigen die Str.GA.I und II mit 4 bis 13% gegenüber Str.GA.III mit 20 bis 24% nur geringen Anteil an gedämpft-elastischer Formänderung. Dieser Umstand wird sich in der Rißgefährdung bemerkbar machen, wie es sich nach den Untersuchungen im Abschnitt 6 bei den Prüfbelägen dann auch gezeigt hat.

Der Gußasphalt Avola ist im Temperaturbereich -10 bis -50°C nur sehr wenig plastisch und auch die Anteile gedämpft-elastischer Formänderung sind nur gering. Damit ist der Bereich, innerhalb dessen die Spannungen abgebaut oder durch gedämpft-elastische Formänderung aufgenommen werden können, sehr klein, so daß der Avola stark rißgefährdet erscheint. Die Untersuchungen nach 6 bestätigen wiederum diese Annahme. Der Avola, der ja auch nicht für eine Beanspruchung durch starke Abkühlung gedacht und dementsprechend auch nicht zusammengesetzt

war, ist also ein gutes Beispiel dafür, wie ein Gußasphalt, der einer starken Abkühlung ausgesetzt sein kann, nicht zusammengesetzt sein darf.

Bei den Dachmastixes fällt auf, daß Dachm.I trotz geringeren Bindemittelgehaltes und geringerer Eindringtiefe und Härtezahl eine größere plastische Verformbarkeit als Dachmastix II aufweist, und zwar bis in den Bereich tiefer Temperaturen um -30 bis -50°C hinein. Sie wird sich dahingehend auswirken, daß die Spannungen auch bei starker Abkühlung noch weitgehend abgebaut werden können. Eine Bestätigung dafür ergab wieder die Prüfung nach 6.

6. Laboratoriumsversuche zur Erzeugung von Rissen in Prüfbelägen

6.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt wird eine Versuchsmethode beschrieben, die es gestattet, unter im Labor erzeugten Bedingungen an Prüfflächen von verhältnismäßig kleinen Abmessungen Risse zu erzeugen. Das Ziel war es, so weit wie möglich die in der Natur gegebenen Verhältnisse nachzuahmen, dabei aber alle Zufälligkeiten und sonstigen Einflüsse, die den Vergleich von Aufbruchproben untereinander sehr erschweren, auszuschalten und nur reine Abkühlung einwirken zu lassen.

Folgende 2 Kühlgeschwindigkeiten wurden gewählt:

- langsame Abkühlung: 1°C in 3 Min., = 70°C in 210 Min
- schnelle Abkühlung: $3,5^{\circ}\text{C}$ in 1 Min., = 70°C in 20 Min.

Die Wahl gerade dieser Kühlgeschwindigkeiten ist willkürlich. Sie sind höher als sie in der Natur vorkommen können; außerdem ist ein solcher Temperatursturz in den gemäßigten Zonen undenkbar. Trotz dieser Einwände mußten diese Bedingungen gewählt werden, damit die Abmessungen der Versuchsanordnung in Grenzen gehalten

werden konnten, die für einen Laboratoriumsversuch tragbar sind.

Im allgemeinen werden Gußasphaltbeläge heute zur Verhinderung der Blasenbildung und zur Vermeidung von Rissen über den Fugen der Unterkonstruktion durch Zwischenschalten einer Papierbahn vom Unterboden getrennt. Zieht sich ein solcher Belag auf Grund eines Temperaturabfalles gleichmäßig zusammen, so wird der Riß eintreten, wenn die Reibungskraft, die zwischen Asphaltbelag und Unterboden aus dem Eigengewicht des Belages entsteht und vom Reibungskoeffizienten zwischen beiden abhängig ist, die Zugfestigkeit des Belages übersteigt. Die Art der Beanspruchung wäre am besten durch eine Einspannung der Belagsränder nachzuahmen. Diese Einspannung ist aber unzuweckmäßig, da sie einwandfrei nicht zu erreichen ist.

Oder aber der Riß, ein Oberflächenriß, entsteht aus den Biegezugspannungen, die sich durch die Einspannung eines Flächenteilchens in einer größeren Fläche dadurch bilden, daß dem Bestreben des Belages, sich infolge einseitiger Abkühlung und damit der Verkürzung der oberen Faser zu den Rändern hin aufzuwölben, vom Eigengewicht des Belages her ein Widerstand entgegengesetzt wird. Diese Beanspruchung wäre am besten durch Aufkleben des Belages auf dem Unterboden nachzuahmen.

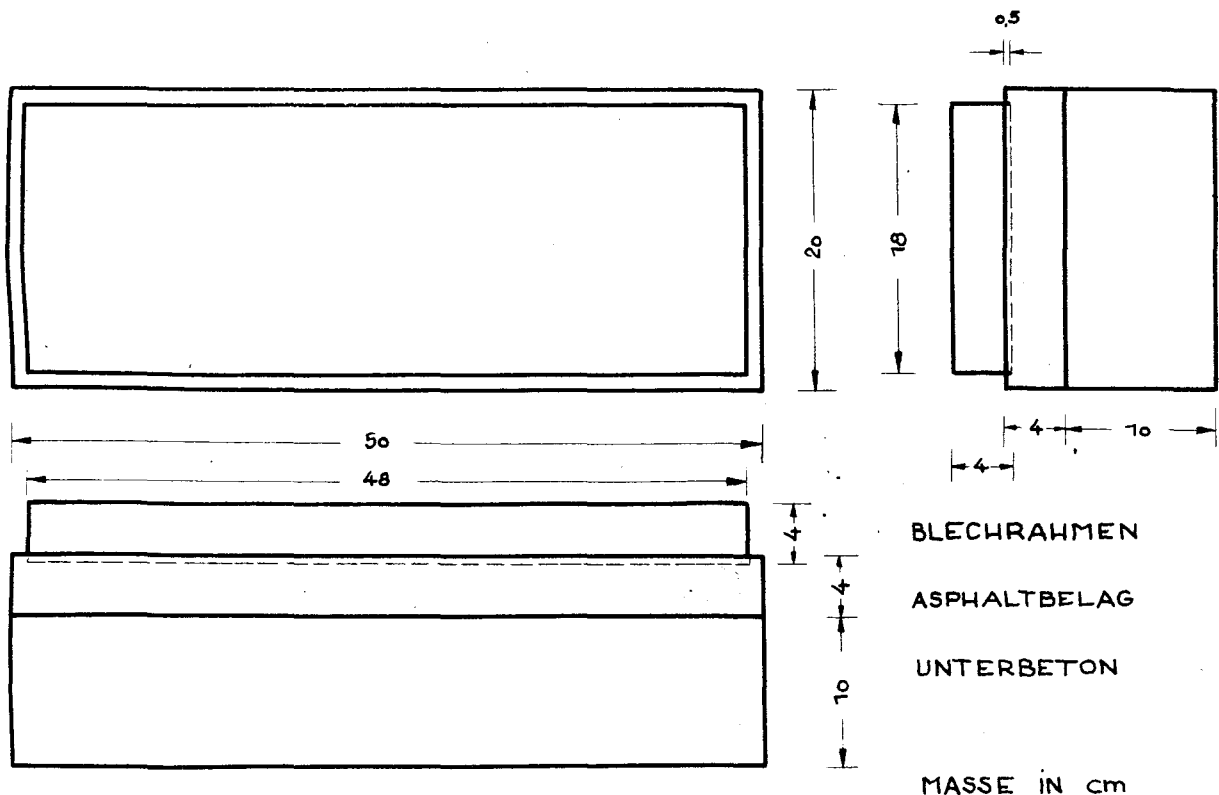
Im Sinne eines möglichst einfachen Versuchsaufbaues wurde hier die Einspannwirkung nur durch das Aufkleben des Prüfbelages auf dem Untergrund erzielt.

Um ein Bild über die jeweilige Temperatur in den einzelnen Querschnittsfasern bei Abkühlung von der Oberfläche her zu erhalten, wurden über den Querschnitt verteilte Thermolemente eingebaut (s. Abb.8). Mit Hilfe dieser Thermolemente sollte ferner festgestellt werden, wie groß der Temperaturunterschied zwischen einer Meßstelle in der Mitte des Belages und einer solchen in den Randzonen ist, da sich die Randzonen durch die umgebende wärmere Luft langsamer abkühlen. Die Temperaturmessungen sollten Unterlagen für Spannungsberechnungen im Querschnitt schaffen.

6.2 Versuchsaufbau

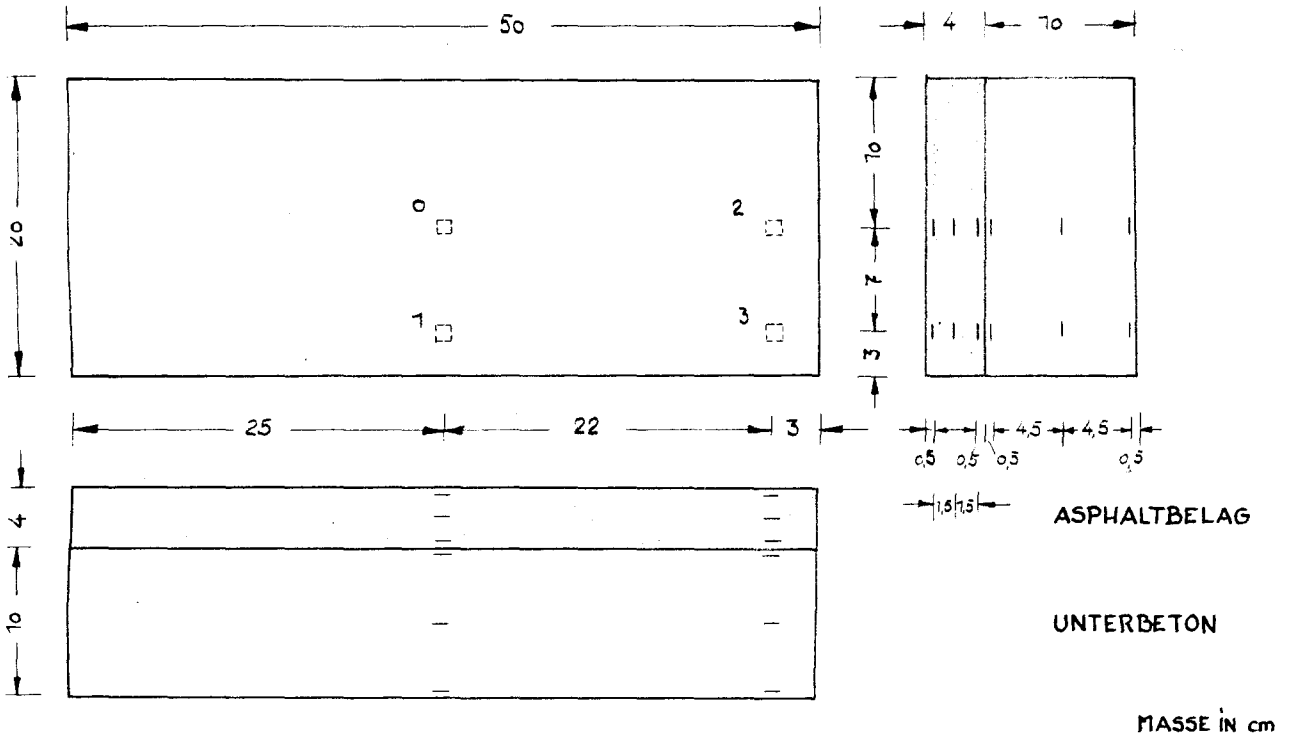
Beläge mit 20 cm x 50 cm Fläche und 4 cm Dicke wurden auf einen 10 cm dicken Unterbeton aufgebracht. Die rauhe Oberfläche des Unterbetons war vorher mit einer Bitumenlösung (Bitumen B 15 : Benzol = 1 : 1) bestrichen, um die Haftung zu verbessern. Nachdem das Lösungsmittel restlos verdunstet war, wurde die Asphaltmasse mit der in 4.3 angegebenen Temperatur in eine Holzschalung eingebracht und die Oberfläche glatt gerieben. Die Oberfläche mußte geglättet sein, damit die Risse später gut erkennbar waren. Eine Begründung dafür wird weiter unten gegeben. Zur Aufnahme der Kühlflüssigkeit, mit der die Abkühlung von der Oberfläche her erfolgte, wurde in die noch warme und damit plastische Masse ein Blechrahmen von 4 cm Höhe etwa 0,5 cm tief hineingepreßt und dann durch Verschmieren der durch das Hineinpressen entstandenen Kehlen mit heißer Asphaltmasse gegenüber dem Belag abgedichtet (Abb. 7).

Abb. 7: Versuchsaufbau "Prüfbeläge"



Die Lage der gleich bei der Herstellung in den Asphaltbelag und den Unterbeton eingebauten Thermoelemente (Cu/Konstantan) ist aus Abb. 8 ersichtlich.

Abb 8 : Lage der Meßstellen o bis 3



Die Thermoelemente konnten über einen Verteilerkasten einzeln mit dem Meßgerät verbunden werden. Das Gerät war so geeicht, daß gegenüber einer Vergleichsmeßstelle von 0°C (Eis-Wassergemisch) Temperaturen über und unter 0°C gemessen werden konnten (Abb. 9).

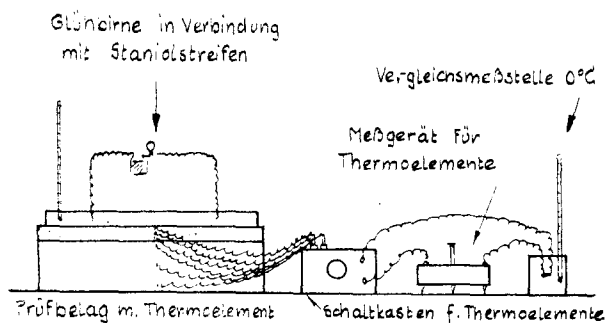


Abb. 9 : Versuchsanordnung Prüfbeläge

Die Risse im Belag waren festzustellen:

- a) am Reißen von stromdurchflossenen Aluminiumfolien, die in etwa 5 mm breiten Streifen auf der Oberfläche aufgeklebt waren. (s. Anlage 65, unten).
Dazu wurde die Oberfläche mit einer Flamme erhitzt und die Folie in den klebrig gewordenen Asphalt hineingedrückt. Die Enden der Folie, die etwa über $\frac{2}{3}$ der Belagslänge reichte, waren über eine Taschenlampenbatterie und ein Lämpchen miteinander verbunden. Riß der Belag, so riß die Folie und das Lämpchen ging aus.
- b) Am Aufsteigen von Blasenbahnen entlang des Risses (Anlage 66 unten). Die Kühlflüssigkeit ist mit gelöstem CO_2 besättigt. An jeder kleinen Spitze oder Kante der Belagsoberseite bilden sich Bläschen, die dann nach oben steigen. Daher obige Forderung, die Oberfläche müsse möglichst glatt sein. War nun ein Riß entstanden, so hatten sich durch das Aufklaffen scharfe Kanten gebildet, an denen gelöstes CO_2 Bläschen bilden konnten, so daß eine regelmäßige Bahn von aufsteigenden Bläschen sofort das Auftreten eines Risses aufzeigte. Auf diese Weise konnte sogar bei weichen Massen, die nicht schlagartig rissen, beobachtet werden, wie sich Risse im Verlauf des Abkühlungsvorganges verlängerten (Anlage 66).
- c) Durch Austreten der Kühlflüssigkeit an den Seiten des Belages (Anlage 66 unten). Dort hatte sich, sobald die Temperatur im Belag unter den Gefrierpunkt abgesunken war, eine Reifschicht gebildet. Durch den Riß trat nun die Kühlflüssigkeit aus und zerstörte die Reifschicht, so daß der schwarze Belag zutage trat. Gingen die Risse nicht durch die gesamte Belagsdicke, so war auch das hier zu erkennen. Die austretende Flüssigkeitsmenge war dann so gering, daß die Reifschicht nur soweit zerstört wurde, wie der Belag gerissen war (Anlage 66 unten).

6.3 Versuchsdurchführung

Die Beläge wurden von der Oberfläche her mit den beiden in 6.1 angegebenen Kühlgeschwindigkeiten von +20 auf -50° C abgekühlt. Die Temperatur der Kühlflüssigkeit, also die Oberflächentemperatur, blieb von da ab während des weiteren Versuchsablaufes bestehen. Gleichzeitig wurden dabei die Temperaturen im Belagsquerschnitt oben, in der Mitte und unten mit Hilfe der Thermoelemente gemessen und alle Veränderungen, wie Zeitpunkt des Auftretens der Risse, Rißverlauf und Knackgeräusche aufgezeichnet.

Da sich die Temperaturen bei den einzelnen geprüften Materialien nur geringfügig unterschieden, konnten die Thermoelemente nach einer Reihe von Versuchen in den später geprüften Belägen fortgelassen werden. Die Versuchsdurchführung gestaltete sich dadurch wesentlich einfacher.

Von den meisten Materialien wurden 5 Beläge bei schneller Kühlgeschwindigkeit geprüft. Von den Str.GA. I und II war nur Material für je 2 Beläge, vom Dachmastix II nur für einen Belag vorhanden.

Die Prüfung mit langsamer Kühlgeschwindigkeit war nur orientierender Natur. Sie beschränkte sich auf 2 Beläge aus H 16, da die Prüfungen mit schneller Abkühlung ausreichten, um die Rißgefährdung der verschiedenen Materialien aufzuzeigen.

Neben diesen Reihenversuchen wurden noch einige Beläge unter Sonderbedingungen geprüft:

- a) ein Belag aus H 16 erhielt auf halber Querschnittshöhe eine Einlage aus Glasfaservlies, um den Einfluß einer Bewehrung des Asphaltes zu untersuchen.
- b) ein weiterer Belag eines H 16 wurde mit einer Dicke von nur 2,5 cm hergestellt, um den Einfluß der Belagsdicke auf die Rißbildung festzustellen.

- c) zur Veranschaulichung der Wirkung einer Haftung des Asphaltbelages auf dem Unterbeton diente die Prüfung von 2 Belägen aus H 16, die auf einer Papierzwischenlage verlegt worden waren und sich somit, mit Ausnahme einer geringen Einspannwirkung durch den 0,5 cm tief in den Belag hineinreichenden Blechrahmen zur Aufnahme der Kühlflüssigkeit, frei auf dem Unterbeton bewegen konnten.
- d) Bei einem weiteren Belag H 16 auf Papierzwischenlage war der Blechrahmen 3 cm tief im Belag eingebettet. Dadurch entstand eine Einspannwirkung durch Haftung der Asphaltmasse an den Rahmenwänden. Es sollte festgestellt werden, ob auch durch diese Art der Einspannung und nicht nur durch Aufkleben der Beläge auf dem Unterbeton Risse erzielt werden konnten.

Nach Beendigung des Versuches stieg die Temperatur im Belag wieder auf Zimmertemperatur ($+20^{\circ}\text{C}$) an. Die Beläge wurden nach Entfernung der Blechrahmen vom Unterbeton gelöst und der tatsächliche Verlauf, die Tiefe und die Anzahl der Risse festgehalten. Sie stimmten mit den Beobachtungen während des Versuches überein. Beläge, die nicht vollständig gerissen waren, wurden auseinandergebrochen. Dabei war die Zone, die gerissen war, klar von der nicht gerissenen zu unterscheiden. Die gerissene Querschnittsfläche war eben, etwas glänzend und tief schwarz, während der durchgebrochene Querschnitt unregelmäßig und bräunlich getönt erschien. (s. Anlage 67 und 68). Dieser Unterschied erklärt sich daraus, daß die Risse bei so tiefen Temperaturen aufgetreten waren, daß die Möglichkeit einer plastischen Formänderung ausgeschaltet war. Das Material war bis zum Augenblick des Bruches weitgehend homogen geblieben. Der demgegenüber bei Zimmertemperatur durchgeführte Bruch des nicht gerissenen Querschnitts erfolgte in einem Temperaturbereich, in dem der Hauptteil der Form-

änderung plastischer Natur ist. Der feste Verband ging nach und nach in dem Maße verloren, in dem sich einzelne Querschnittsteile voneinander lösten, so daß das Bruchbild diese zerklüftete Fläche zeigte.

6.4 Temperatur im Querschnitt

Die während des ganzen Versuchsablaufes im Querschnitt von Beton und Asphalt gemessenen Temperaturen sind einmal für die einzelnen Meßstellen in Abhängigkeit von der Zeit (z.B. Anlage 29), zum anderen in einem bestimmten Zeitpunkt in Abhängigkeit von der Höhenlage im Querschnitt aufgetragen worden (z.B. Anlage 30/31).

Für den Belag 1, H 16 geschah Letzteres z.B. für den Zeitpunkt der 1. Rißbildung (nach 23 Minuten Abkühlzeit), dann nach 30, 60 und 120 Minuten Abkühlung (Anlagen 30/31). Die für den Asphalt anfänglich schwach gekrümmte Kurve wurde im Verlauf der Abkühlung immer flacher. Bei langsamer Abkühlung (Anlagen 39 und 41) ist sie völlig gerade.

Im Beton erreicht der Einfluß der Oberflächenabkühlung zwar noch die Unterseite desselben, doch wirkt sie sich in größerer Tiefe nur noch wenig aus. Der Sprung zu den Temperaturen im Unterbeton hin läßt sich dadurch erklären, daß nach dem Aufbringen des Asphaltbelages zwischen diesem und dem Unterbeton mit seiner verhältnismäßig rauhen Oberfläche eine Luftschicht zurückbleibt. Besonders auffällig ist dieser Sprung bei dem Belag, bei dem eine Papierzwischenlage eingeschaltet wurde (Anlage 37).

Für die langsame Abkühlung sind in Zahlentafel 13, Anlage 42 die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Meßstellen 0 bis 3 zusammengestellt. Dieser Unterschied kann bei -50°C zwischen Meßstelle 0 bis 3 mehrere Grade betragen, er wird sich jedoch auf die

Spannungsverhältnisse im Querschnitt nur sehr wenig auswirken. Bei schneller Abkühlung sind die Unterschiede noch geringer, da ein Wärmeaustausch mit der umgebenden Luft sich nicht in demselben Maße auswirken kann wie bei der langsamen Abkühlung.

Die Unterschiede im Temperaturverlauf innerhalb des Querschnittes waren bei den verschiedenen Asphaltarten so gering, daß sie im Hinblick auf eine möglichst einfache Auswertung vernachlässigt werden konnten. Im Folgenden soll rechnerisch nachgewiesen werden, daß dazu die Berechtigung bestand (Zahlentafel 20).

Nach der von Geiger (7) angegebenen Formel

$$\delta_2 = \delta_1 \cdot e^{(x_1 - x_2) \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c}{T \cdot \lambda}}}$$

(s. Abschnitt 5.21) läßt sich der Temperaturverlauf im Querschnitt mit ausreichender Genauigkeit errechnen, wenn Wärmeleitfähigkeit λ und spezifische Wärme c des Materials, bekannt sind. Die Formel erwies sich auch für die schnelle Kühlgeschwindigkeit (70°C in 20 Minuten) noch als gut brauchbar.

Zuerst sei der Einfluß der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur untersucht. Dazu wurden für die Materialien H 12, H 16 und J 22 die Temperaturen im Asphaltbelag in 0,04 cm Tiefe für 2 extreme λ -Werte ermittelt. Allgemein ist:

Die Tiefenlage der Meßstelle "oben" $x_1 = 0 \text{ m}$, der Meßstelle "unten" $x_2 = 0,04 \text{ m}$; $x_1 - x_2 = -0,04 \text{ m}$,
 $\delta_1 = 70^\circ \text{C}$ = Unterschied zwischen dem Höchst- und Tiefstwert an der Belagsoberfläche,

$T = 2 \cdot 20 \text{ Min} \hat{=} 0,667 \text{ Std.}$ = Schwingungsperiode der Wärmewelle (schnelle Abkühlung 70°C in 20 Minuten)

$\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$ = Raumbgewicht (für alle Massen gleich angenommen)

und damit:

$$\delta_2 = 70 \cdot e^{-0,04 \sqrt{\frac{\pi \cdot 2200 \cdot c}{0,667 \cdot \lambda}}}$$

Ist ferner t_0 die Anfangstemperatur von $+20^{\circ}\text{C}$ und t_2 die gesuchte Temperatur in der Tiefe x_2 , so ist dann

$$t_2 = t_0 - \delta_2$$

Δt_2 ist der Temperaturunterschied zwischen t_2 errechnet mit der Wärmeleitzahl λ für $+20^{\circ}\text{C}$ und t_2 errechnet mit λ für -50°C .

Für den Wert $\frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ ist in den folgenden Zahlentafeln der Buchstabe a eingesetzt, so daß die Formel dann lautet:

$$\delta_2 = \delta_1 \cdot e^{(x_1 - x_2)} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{T \cdot a}}$$

Die Zahlenwerte für λ und c sind den Zahlentafeln 3 und 4, Abschnitt 5.22 entnommen.

Einfluß der Abhängigkeit der Wärmeleitzahl von der Temp.

Z a h l e n t a f e l 20

Material	c	$\frac{\lambda_{+20^{\circ}}}{\lambda_{-50^{\circ}}}$	a	$e^{-\dots\dots}\delta_2$	t_2	Δt_2	
	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}}$	$\frac{\text{m}^2}{\text{h}}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	
H 12	0,21	0,998 0,913	0,00195 0,00198	0,1410 0,1425	9,9 10,0	+10,1 +10,0	0,1
H 16	0,22	0,867 0,942	0,00179 0,00195	0,2052 0,1968	8,6 9,8	+11,4 +10,2	1,2
J 22	0,24	0,712 1,150	0,00135 0,00218	0,0945 0,1547	6,6 10,8	+13,4 9,2	4,2

Die errechnete Temperatur schwankt auf Grund der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitzahl in Grenzen bis zu 4°C . Wird daher für den Kühlbereich $+20/-50^{\circ}\text{C}$ eine mittlere Wärmeleitzahl für eine mittlere Temperatur von -15°C (für H 16 ist dann $a = 0,00187 \text{ m}^2/\text{h}$) in die Rechnung eingeführt, so kann der Rechenwert für die verschiedenen Materialien entsprechend dem in Frage kommenden Bitumengehalt bis zu höchstens $\pm 2^{\circ}\text{C}$ variieren.

Diese Genauigkeit dürfte für die hier durchzuführenden Berechnungen durchaus genügen; sie ist bei der Durchschnittsgenauigkeit der Messungen völlig ausreichend.

Welchen Einfluß hat das Raumbgewicht ϱ ? Dieser Einfluß sei ebenfalls an einem Beispiel durchgerechnet:

Material H 16, $c = 0,22$

Einfluß des Raumbgewichtes ϱ

Z a h l e n t a f e l 21

ϱ	λ_{-15°	a	$e^{-\dots}$	δ_2	t_2	Δt_2
2200	0,904	0,00 187	0,1340	9,4	+10,6	0,4
2100	0,904	0,00 195	0,1396	9,8	+10,2	

Eine Differenz der Raumbgewichte von 100 kg/m^3 führt also nur zu einer rechnerischen Temperaturveränderung von $0,4^\circ \text{ C}$ - sie ist ebenfalls bei der allgemeinen Genauigkeit der durchzuführenden Rechnung ohne Belang.

Auf Grund dieser Erkenntnisse werden nun die Temperaturen im Asphaltquerschnitt mit entsprechenden Vereinfachungen rechnerisch ermittelt und für beide Abkühlgeschwindigkeiten den bei den Versuchen tatsächlich gemessenen Werten gegenübergestellt. Die Rechnung soll sich hier nur auf den Hartmastix 16% beschränken, da sich für die anderen Materialien keine wesentlich anderen Werte ergeben werden.

H 16: $\lambda_{-15^\circ} = 0,904$; $c = 0,22$; $\varrho = 2200$

$a_{\text{Mittel}} = 0,00 187$; $\delta_1 = 70$

schnelle Abkühlung: $T = 2 \cdot 0,333 = 0,667 \text{ Std.}$

Z a h l e n t a f e l 22

Z a h l e n t a f e l 22

Boden- tiefe ($x_1 - x_2$) m	$\sqrt{\frac{T}{T \cdot a}}$ 1/m	$(x_1 - x_2) \cdot \sqrt{\frac{T}{T \cdot a}}$	$e^{-\dots}$	δ_2 °C	t_2 in °C	
					errechn.	gemess.
- 0,005	50,22	-0,251	0,779 78	54,6	-34,6	-28
- 0,02	"	-1,0	0,367 88	25,8	- 5,8	- 9
- 0,035	"	-1,71	0,180 94	12,7	+ 7,3	+ 5
- 0,04	"	-2,01	0,134 05	9,4	+10,6	+10

Langsame Abkühlung: $T = 2 \cdot 3,5 = 7$ Std.

Z a h l e n t a f e l 23

Boden- tiefe ($x_1 - x_2$) m	$\sqrt{\frac{T}{T \cdot a}}$ 1/m	$(x_1 - x_2) \cdot \sqrt{\frac{T}{T \cdot a}}$	$e^{-\dots}$	δ_2 °C	t_2 in °C	
					errechn.	gemess.
- 0,005	15,5	-0,0775	0,926 30	64,9	-44,9	-44
- 0,02	"	-0,31	0,733 77	51,4	-31,4	-32,5
-0,035	"	-0,542	0,582 25	40,8	-20,8	-17,5
- 0,04	"	-0,62	0,538 37	37,7	-17,7	-16,5

Die Ergebnisse aus Messung und Rechnung stimmen bei der langsamen Abkühlung gut überein; bei der schnellen Abkühlung ist die Übereinstimmung an der Belagsunterseite gut, in der Mitte und an der Oberfläche ausreichend. Es muß dabei berücksichtigt werden, daß einmal bei der gro- Ben Abkühlgeschwindigkeit von 70° C in 20 Minuten die Temperaturen sich im oberen Teil des Querschnitts schnell ändern, zum anderen, daß die Höhenlage der Meßstellen (Cu-Plättchen von 2 cm² Fläche) etwas schwan- ken kann. Beim Einbau der Thermoelemente ist die Asphalt- masse sehr weich, geringe Spannungen im Draht der Thermo- elemente können die Lage der Kupferplättchen leicht um einige mm verändern, ohne daß das vor dem Aufbrechen des Belages bei der Beendigung des Versuches zu erkennen wäre. Die Höhenlage schwankte manchmal um 1 bis 2 mm.

Abschließend betrachtet ist mit dieser Rechenmethode ohne weiteres die Möglichkeit gegeben, bei Kenntnis der mittleren Wärmeleitzahl λ des in Frage kommenden Temperaturbereiches, der spezifischen Wärme c und des Raumgewichtes ρ eines Materials den jeweiligen Temperaturverlauf im Querschnitt eines Belages zu errechnen, wenn dieser Belag einer einseitigen Abkühlung ausgesetzt ist; die umständliche Feststellung des Temperaturverlaufs im Querschnitt mit Hilfe von Thermoelementen wird damit hinfällig.

6.5 Ergebnisse

In den Anlagen 24 bis 62 sind die Versuchsergebnisse einmal in den Zahlentafeln 9 bis 19 zusammengefaßt, zum anderen mit

Rißbild

Rißformen

Temperaturverlauf im Belag während des gesamten Versuches mit Angabe des Zeitpunktes der Rißbildung und

Temperaturverlauf im Querschnitt in einem bestimmten Augenblick (beim Auftreten des 1. Risses, nach 30 Minuten, nach 1 und nach 2 Stunden)

in Zeichnungen dargestellt.

Die Zahlentafel 9, Anlage 24 bringt die Mittelwerte der Versuchsergebnisse aller geprüften Materialien. Die Rißneigung läßt sich danach aus der "Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses" erkennen, die sowohl für wilde Oberflächenrisse als auch für die Hauptrisse angegeben ist. Dazu sind die jeweiligen Temperaturen der Kühlflüssigkeit und die Temperaturen im Asphaltquerschnitt aufgetragen. Aus dem Temperaturverlauf im Querschnitt im Augenblick des 1. Risses (z.B. Anlage 30 Oben) ist auf die Temperatur an der Unterseite des Asphaltbelages geschlossen worden.

Ferner geben die Zahlentafeln 9 bis 19 die Anzahl der unvollständigen und vollständigen Risse an. Die Werte

der Zahlentafel 9, Anlage 24 sind im allgemeinen Mittelwerte aus je 5 Versuchen. Der Unterschied bei den 5 Versuchen in der "Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Hauptrisses" (in Minuten) gegenüber dem Mittelwert beträgt bei schneller Abkühlung bis zu \pm 2 Minuten.

Im Verlauf der Abkühlung traten bei schneller Abkühlung nach 11 bis 30 Minuten zuerst wilde Oberflächenrisse auf, die bis zu 5 cm lang und nur wenige mm tief waren. Unregelmäßig über die Oberfläche verteilt, lag ihre Hauptrichtung doch fast ausschließlich in Querrichtung, also parallel zur 20 cm langen Kante des Prüfbelages. Sie verschwanden gewöhnlich wieder, nachdem sich die Hauptrisse gebildet hatten. Meistens bildeten sich später Hauptrisse dort, wo vorher schon ein Oberflächenriss war, wo also der Querschnitt in der oberen Faser schon geschwächt war.

Nach weiterer Abkühlung traten dann die Hauptrisse auf. Diese lagen ausnahmslos in Querrichtung des Belages und gingen entweder in der gesamten Belagsbreite durch den gesamten Querschnitt hindurch oder aber nur über einen Teil der Belagsbreite oder über einen Teil des Querschnitts (Anlage 67), je nach der Rißneigung des jeweiligen Materials. Entsprechend groß war auch die Anzahl der Risse; sie schwankt zwischen 0 und 2 vollständigen und 0 bis 5 unvollständigen.

Bei langsamer Abkühlung (H 16, Zahlentafel 12, Anlage 34 und 38 bis 41) traten keine wilden Oberflächenrisse auf, da hier anscheinend genügend Zeit vorhanden war, daß sich die anfänglichen Oberflächenspannungen durch Fließen des Materials abbauen konnten. Die Hauptrisse bildeten sich dann aber in der gleichen Form aus wie bei den Belägen, die mit schneller Abkühlung geprüft wurden.

Der 1. Riß trat in der Regel ziemlich in der Mitte des Belages in Querrichtung auf. Der Verlauf ist fast gerade. Weitere, zum Teil unvollständige Risse waren in den Viertelpunkten festzustellen. Sie waren unregelmäßiger als die 1. Hauptrisse. Als charakteristisches

Beispiel sind in der Anlage 67 die Fotografien der Rißbilder eines H 12 - Belages gezeigt (H 12, Belag 3, Rißbild Anlage 26), bei dem ein vollständiger und 2 unvollständige Risse auftraten. Einer von den unvollständigen Rissen erstreckte sich über die gesamte Belagsbreite, er geht allerdings nicht bis zur Unterseite des Asphaltbelages durch. Der zweite unvollständige Riß geht zwar bis zur Unterseite des Asphaltbelages durch, er erstreckt sich jedoch nicht über die gesamte Belagsbreite.

6.6 Besprechung der Ergebnisse

6.61 Wilde Oberflächenrisse

Die Abhängigkeit der Neigung zur Bildung von wilden Oberflächenrisen von der Zusammensetzung und den Eigenschaften der Materialien entspricht im allgemeinen derjenigen, wie sie später auch für die Hauptrisse gefunden wurde. Das dort Gesagte gilt also auch hier.

Die Differenz in der "Kühlzeit bis zum Auftreten von wilden Oberflächenrisen" bei den Mastixsorten ist zu gering, als daß sich Schlüsse auf das Rißverhalten ziehen ließen. Bei den anderen Materialien ist lediglich auffallend, daß die Oberflächenrisse bei den Materialien, die stärker zu Rissen neigen (Avola, Str.GA.I und II) trotz höherer "Kühlzeiten bis zum Auftreten des 1. Hauptrisses" etwa im selben Zeitpunkt auftreten wie bei den rißempfindlichen Mastixsorten, während die rißfesten Materialien, wie Str.GA. III und Dachmastix I (beide im Labor nach einem Rezept sorgfältig zusammengesetzt) erst nach einer größeren Kühlzeit Oberflächenrisse aufwiesen.

6.62 Hauptrisse

Aus der für die verschiedenen Materialien so eindeutig unterschiedlichen "Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Hauptrisses" kann auf die Neigung der Materialien zur Bildung von Rissen geschlossen werden. Im Einzelnen sei zuerst das Verhalten der verschiedenen Materialien betrachtet:

Isolier- und Hartmastix (Anlagen 25 bis 48):

Bei den Mastixsorten ist der Kornaufbau bei den verschiedenen Mischungen annähernd gleich. Die Rißneigung wird daher ausschließlich durch die Bindemittelmenge und die Bindemittleigenschaften bestimmt.

Hartmastix 16% weist den größten Widerstand gegen das Reißen auf. Nach i.M. 24 Minuten, bei einer Temperatur von -50°C an der Oberfläche und einer Durchschnittstemperatur von -13°C in 20 mm Tiefe trat der 1. Hauptriß auf.

Isoliermastix 16% ist mit gleichem Bindemittelgehalt, aber niedrigerem Erweichungspunkt schon nach i.M. 21 Minuten gerissen. Demnach ist das viskosere Bindemittel des H 16 (Ep. $R+K = 70^{\circ}\text{C}$) besser als das weichere Bindemittel des J 16 (Ep. $R+K = 58^{\circ}\text{C}$) geeignet, die Haftung der Mineralteilchen auch bei tiefen Temperaturen aufrechtzuerhalten.

Der Hartmastix 12 % hat zwar ein Bindemittel mit dem gleichen Erweichungspunkt $R+K$ wie der H 16, es ist jedoch anscheinend nicht genügend Bindemittel vorhanden, um die Haftung zu gewährleisten, denn der 1. Riß trat schon nach i.M. 18 Minuten auf. In diesem Zusammenhang muß die Kornzusammensetzung des Mastix berücksichtigt werden. Bei dem hohen Füllergehalt der Mineralmasse von rund 40 % ist eine verhältnismäßig große Bindemittelmenge erforderlich, um alle Mineralkörner ausreichend zu umhüllen.

Der Isoliermastix 22 % ist wiederum noch rißempfindlicher als J 16, da er ihm gegenüber viel mehr Bindemittel

enthält. Hinzu kommt, daß der Ausdehnungskoeffizient im Zusammenhang mit dem Bindemittelgehalt beim J 22 eindeutig größer ist als beim J 16. J 22 zieht sich damit bei der Abkühlung mehr zusammen, sodaß der Belag in seinem Querschnitt mehr beansprucht wird.

Aus dem Vergleich der Mastixsorten ist folgender Schluß zu ziehen:

Die Bitumenmenge darf nicht zu gering sein (H 12/ H 16), aber auch nicht zu hoch (J 16/ J 22). Der Erweichungspunkt darf nicht zu niedrig liegen (H 16/ J 16) und nicht zu hoch (H 16 / Avola). Es gibt eine optimale Zusammensetzung, bei der die Rißempfindlichkeit am geringsten ist (H 16).

Straßengußasphalte (Anlagen 49 bis 52)

Die Unterschiede zwischen Str.GA.I und II liegen im Bindemittelgehalt, im Erweichungspunkt des Bindemittels und im Füllergehalt. Str.GA.II ist von beiden mit dem höheren Bindemittelgehalt und dem niedrigeren Erweichungspunkt der weichere Gußasphalt. Nach dem Vergleich mit den Mastixsorten wirkt sich in diesem Bereich des Bindemittelanteils eine größere Bindemittelmenge günstig aus. Durch den höheren Fülleranteil ist die Mineralmasse besser aufgebaut. Welchen Einfluß die Höhe des Erweichungspunktes beim Str.GA. I hat, ist nicht eindeutig zu sagen; es sollen hier daher keine Schlüsse daraus gezogen werden.

Wenn der Unterschied in der "Kühlzeit" mit 26 Minuten für Str.GA. I und 27 Minuten für Str.GA. II auch geringer ist als zum Beispiel zwischen H 12 und H 16, so ist ein Unterschied doch festzustellen. Das Bindemittel erscheint mit einem Ep. R+K von 87° C für den Str.GA.I schon reichlich hart, was sich auch in der für einen Straßengußasphalt geringer Eindrucktiefe von 1,3 mm auswirkt.

Die größere Rißfestigkeit der Str.GA. I und II gegenüber H 12 erklärt sich aus der weitaus gröberen Struktur des Mineralgerüsts. Es ist jeweils nur ein unvollständiger Riß bei den Str.GA. I und II entstanden, dessen Rißbild eine durch die Verzahnung des Minerals unregelmäßige Bruchfläche zeigt (s. Bruchbilder Anlage 68). Die Verzahnung sowie auch der geringe Fülleranteil wirken sich gegenüber H 12 rißhemmend aus, denn H 12 enthält, wie oben festgestellt, mit seinem sehr feinkörnigen Mineralanteil zu wenig Bindemittel.

Der Str.Ga. III, der im Labor zusammengesetzt war, zeigt eine noch weitaus größere Rißfestigkeit. Es ist dort nur gelungen, nachdem sich auch die Oberflächenrisse schon später als bei den anderen Mischungen einstellten, trotz einer Gesamtkühlzeit von 1 Stunde nur in einem Fall einen unvollständigen, sehr kleinen Riß zu erzeugen. Die in der Zahlentafel 9, Anlage 24 angegebenen Werte sind deshalb in Klammern gesetzt. Der Bindemittelgehalt liegt mit 10 %, der Füllergehalt mit 27 % in einem günstigen Bereich. Mit den Ergebnissen der Versuche am Str.GA. III konnte gezeigt werden, wie rißfest ein gut zusammengesetzter, nicht überhitzter Gußasphalt sein kann.

Dabei muß noch erwähnt werden, daß die beiden auf der Baustelle aus Kochern entnommenen Straßengußasphalte I und II, die ja auch bei den Laborversuchen früher gerissen sind als z.B. der Str.GA. III, auf der Straße bereits nach einer Liegezeit von 1 Jahr schon eine ziemliche Anzahl von Rissen aufwiesen. Die Risse waren unregelmäßig verteilt (der Unterbeton war aus erdfeucht eingerütteltem Beton 300 ohne Fugen hergestellt), sie lagen hauptsächlich quer zur Straßenlängsachse.

Gußasphalt 'Avola-Mastifix', Anlagen 56 bis 58:

Der Gußasphalt Avola, der für eine Verwendung als Unterboden oder schwimmender Estrich in Gebäuden gedacht ist, wo er unter normalen Verhältnissen extrem tiefen Temperaturen nicht ausgesetzt sein wird, ist als Beispiel dafür anzusehen, wie ein auf starke Abkühlung

beanspruchter Gußasphalt nicht zusammengesetzt sein soll. Er weist von allen Materialien mit 3 bis 6 über die gesamte Querschnittshöhe verteilten Rissen die größte Rißneigung auf. Bemerkenswert ist dabei, daß sich die Risse, die sich fast ausschließlich nicht über die gesamte Querschnittsbreite erstrecken, abwechselnd von der einen und dann von der anderen Längsseite des Belages etwa über die halbe Querschnittsbreite ausdehnen und daß es nicht, wie z.B. beim H 12, zu mehreren vollständigen Hauptrissen kommt. Eine Erklärung für diese Erscheinung mag sein, daß die zahlreichen Oberflächenrisse schon genügend Anreiz zur Bildung von gleichmäßig mit kurzen Abständen über die Oberfläche verteilten unvollständigen Hauptrisse boten, wie auch das Material wegen des hohen Erweichungspunktes des Bindemittels an sich schon sehr spröde ist.

Ein Vergleich des Avola z.B. mit dem Str.GA.I zeigt, daß die "Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses" gleich groß ist, während Zusammensetzung und Bindemittelgehalt sowie Rißanzahl und Rißart stark voneinander abweichen. Eindringungstiefe und Erweichungspunkt des Bindemittels und damit dessen PI und auch der Brechpunkt weisen dagegen annähernd die gleichen Werte auf. Nach den Ergebnissen der Voruntersuchungen an den 3 Straßengußasphalten wäre bei Avola der Erweichungspunkt zu hoch, um das Material wenig rißempfindlich zu machen. Die Rißhäufigkeit und Rißart beim Avola bestätigen dieses. Der hohe Bindemittelgehalt ist im Zusammenhang mit dem großen Füllergehalt erforderlich, so daß daraus, bei einem Vergleich mit H 16, eine hohe Rißempfindlichkeit nicht abzuleiten wäre.

Dachmastix I und II (Anlagen 59 bis 62):

Der Dachmastix I, der wie der Straßengußasphalt III nach einem Rezept im Labor zusammengestellt worden war, zeigt genauso wie dieser trotz einer Gesamtkühlzeit von 1 Stunde keinen einwandfreien Riß (auch hier sind deshalb die in der Zahlentafel 9, Anlage 24 angegebenen Werte in Klammern aufgeführt), während der Dachmastix II

schon nach einer Kühlzeit von 22 Minuten einen vollständigen Riß aufwies. Aus den mit den Mastixsorten gesammelten Erfahrungen ist das Versagen des Dachmastix II auf den zu hohen Bindemittelgehalt zurückzuführen, dem im Vergleich zum Dachmastix I ein geringerer Füllanteil gegenüber steht. Die mangelnde Stabilität der Mischung drückt sich ebenfalls in der besonders hoch liegenden Härtezahl nach Wilson aus, die den nach den belgischen Vorschriften zulässigen Höchstwert von 80 erheblich überschreitet.

Wenn die "Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses" mit dem PI des in den Materialien verwendeten Bitumens verglichen wird, so ergibt sich mit überraschender Deutlichkeit, daß bei den hier geprüften Materialien auf eine lange 'Kühlzeit' meist auch ein hochliegender PI fällt. Damit zeigt sich die besondere Wichtigkeit der Wahl der richtigen Bitumensorte. Der PI liegt dabei immer im Bereich zwischen -2 und +2, im Bereich, in dem die Mehrzahl der im Straßenbau verwendeten Bitumen zu finden ist.

Z a h l e n t a f e l 24

Material	H 12	H 16	J 16	J 22	Avola
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	18	24	21	18	26
Penetrationsindex PI	-0,3	+1	-0,4	-0,5	+1,2

Material	Straßengußasphalt			Dachmastix	
	I	II	III	I	II
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	26	27	(30)	(36)	22
Penetrationsindex PI	+1,2	+0,1	+1,5	+1	-0,2

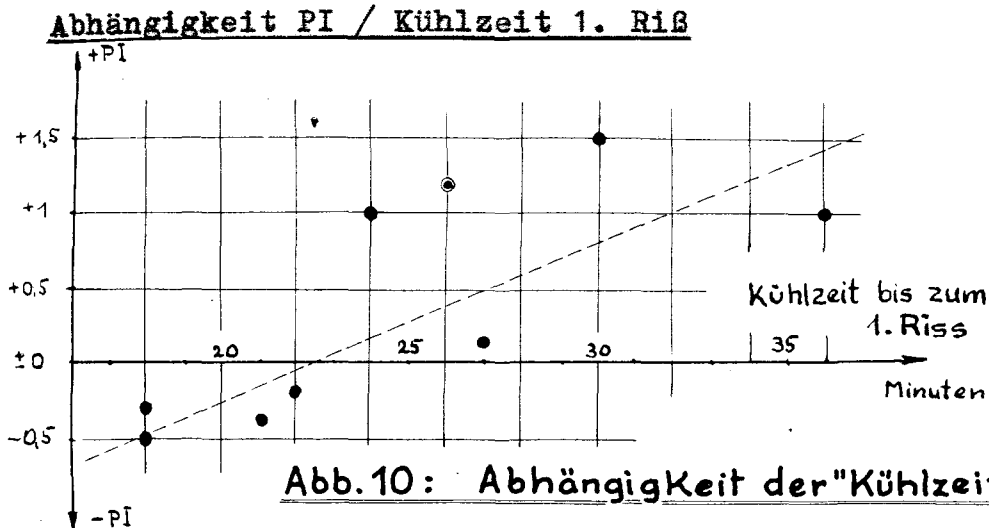


Abb.10: Abhängigkeit der "Kühlzeit
bis zum 1. RiB" vom Penetrationsindex PI

Sonderprüfungen, durchgeführt mit H 16 (Anlagen 34 bis 37):

(a) Glasfaservlieseinlage (Anlage 34/35):

Die Glasfaservlieseinlage schiebt den Zeitpunkt des 1. Risses nicht hinaus. Der 1. RiB war ein vollständiger, wie auch bei allen anderen Belägen aus H 16. Der 2. RiB, ein unvollständiger, erstreckte sich über die gesamte Querschnittsbreite, reichte aber nur herab bis zum Glasfaservlies. Eine wesentliche Verbesserung der RiBfestigkeit war demnach gegenüber einem unbewehrten Prüfbelag H 16 nicht festzustellen.

(b) Die Verringerung der Belagsdicke von 4 cm auf 2,5 cm führte zu keinen neuen Erkenntnissen. Die "Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses" lag zwar um 1 Minute über der Durchschnittskühlzeit für die 4 cm dicken Beläge, doch ist darin kein grundsätzlich anderes Verhalten zu erkennen, da eine Kühlzeit von 25 Minuten durchaus im Streubereich der Messungen liegt. Es kann daraus der Schluß gezogen werden, daß die RiBempfindlichkeit bei Gußasphalt- und Mastixbelägen von normaler Dicke durch die Belagsdicke nicht verändert wird. Dieser Schluß ist wegen der geringen Anzahl der Versuche mit Belägen von 2,5 cm Dicke jedoch nur mit Vorsicht zu ziehen.

(c) Die zur Veranschaulichung der Wirkung einer Haftung des Asphaltbelages auf dem Unterbeton durchgeführten Versuche mit Papiertrennschicht zwischen beiden zeigten einwandfrei, daß Risse nur bei Vorhandensein dieser Haftung zu erzielen waren. Die geringe Einspannung des Belages durch die Haftung des Materials an dem Blechrahmen für die Aufnahme der Kühlflüssigkeit war unerheblich, da der Blechrahmen nur 0,5 cm tief in den Belag herabreichte.

(d) Daß aber auch die Haftung an diesem Blechrahmen groß genug für die Erzielung von Rissen sein kann, zeigte der Belag 7, H 16 (Anlage 36/37), bei dem der Rahmen bei der Herstellung des Prüfkörpers 3 cm tief in den Belag eingebettet worden war. Hier trat nach der üblichen Kühlzeit von 23 Minuten ein vollständiger Riß in der Mitte des Belages auf. Dieser Fall demonstriert, daß die Risse unter gleichen Abkühlungsbedingungen bei Prüfbelägen ohne Haftung mit dem Untergrund und einer Einspannung in einem größeren Feld genauso auftreten wie bei Behinderung der Zusammenziehung durch Verkleben mit der Unterlage.

(e) Langsame Abkühlung H 16 (Anlagen 34 und 38 bis 41):
Bei langsamer Abkühlung traten keine Oberflächenrisse auf. Das Material hatte genügend Zeit, die durch einseitige Abkühlung vornehmlich in der Oberfläche auftretenden Biegezugspannungen durch plastisches Fließen wieder abzubauen. Die Art der später sich bildenden Hauptrisse wurde durch die langsame Abkühlung nicht beeinflusst. Das Temperaturgefälle im Querschnitt war mit 35° C erheblich geringer als bei schneller Abkühlung mit 55° C, die Kurve des Temperaturverlaufs im Asphaltquerschnitt ist fast vollständig gerade (s. auch die

Bestätigung durch die Nachrechnung der Temperatur im Abschnitt 6.4, Zahlentafel 23). Die Anzahl der Risse ist mit ein bis zwei vollständigen und zwei unvollständigen Rissen bei langsamer Abkühlung sogar noch höher als bei schneller Abkühlung mit einem vollständigen und ein bis zwei unvollständigen Rissen. Die Durchschnittstemperatur im Belag = Temperatur der Meßstelle "Mitte" (in 2 cm Tiefe) liegt mit -29°C erheblich niedriger als bei schneller Abkühlung mit -13°C . Das bedeutet, daß der 1. Riß nicht durch eine plötzliche Versprödung des Materials bei schnellem Herunterkühlen entstanden ist, sondern durch langsameres Abkühlen, wie es auch in der Natur in ähnlicher Form auftritt.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse aus schneller und langsamer Abkühlung des H 16 ist der Schluß zu ziehen, daß einmal die Oberflächentemperatur, die zur Erzielung von Rissen erforderlich ist, desto niedriger liegt, je schneller die Abkühlung erfolgt (-50°C bei schneller und -46°C bei langsamer Abkühlung), zum anderen, daß bei der entwickelten Versuchsanordnung die Schnelligkeit der Abkühlung sich nicht grundsätzlich auf die Art der Rißbildung auswirkt. Damit ist zu erkennen, daß die schnelle Abkühlung, die aus Gründen einer möglichst einfachen und schnellen Versuchsdurchführung der langsamen vorzuziehen ist, für eine Charakterisierung von verschiedenen Asphaltmischungen auf ihre Rißneigung hin ausreichend ist.

6.7 Rechnerische Ermittlung von Spannungen im Bereich tiefer Temperaturen

Um ein Bild über die Größe der im Augenblick des Reißens im Querschnitt auftretenden Spannungen zu erhalten, sollen mit Hilfe der für die Abgrenzung von elastischem und plastischem Bereich gefundenen Werte (Abschnitt 5.4) näherungsweise Spannungsberechnungen durchgeführt werden. Ihnen wird die Annahme zu Grunde gelegt, daß die Risse

erst dann auftreten, wenn mit fortschreitender Abkühlung ein Spannungsabbau durch plastische Formänderungen nicht mehr eintreten kann und die aus der Zusammenziehung resultierenden Zugspannungen, die bis zur Reißbildung durch elastische Formänderungen aufgenommen werden, die Bruchgrenze überschreiten.

Der Spannungsberechnung wird das Hooke'sche Gesetz zu Grunde gelegt, da die Berechnungen nur in dem Temperaturbereich vorgenommen werden, in dem die plastischen Formänderungen gegenüber den elastischen soweit zurücktreten, daß sie, allerdings nur bei näherungsweise Berechnung, vernachlässigt werden können.

Eine näherungsweise Berechnung ist deshalb nur möglich, weil eine exakte Trennung des plastischen Verformungsbereiches gegenüber dem elastischen nicht durchführbar ist. Das Material besitzt gleichzeitig plastische sowie elastische Eigenschaften, von denen die plastischen bei höheren, die elastischen bei niedrigeren Temperaturen überwiegen, während sie in dem Temperaturbereich, der zur Diskussion steht, bei Abkühlung kontinuierlich ab- bzw. zunehmen.

Soll nun die Temperatur festgelegt werden, die für die Spannungsberechnung nach dem Hooke'schen Gesetz als Ausgangswert zu gelten hat (im Folgenden "Trennpunkt" genannt), bei der also näherungsweise die plastische Verformbarkeit aufhört und nur noch elastische Formänderungen möglich sind, so gibt es dazu 2 Möglichkeiten:

(a) aus den Kurvenscharen "Verformungsanteile in Abhängigkeit von der Temperatur" (Anlagen 15 bis 20) wird diejenige Temperatur herausgesucht, bei der die Kurve der plastischen Formänderungsanteile mit fallender Temperatur eine augenfällige Biegung zur Horizontalen hin macht (z.B. Kurve Dachmastix I bei -10° C) bzw. bei Kurven ohne auffällige Biegung sich der Abszisse stark genähert hat (z.B. Dachmastix II bei -13° C)

Oder

(b) grundsätzlich für alle Materialien, wie verschieden sie in ihrem physikalischen Verhalten auf Grund von Zusammensetzung und Bindemittleigenschaften auch sein mögen, wird als Grenze die Temperatur gesetzt, bei der die plastischen Formänderungsanteile in % der Gesamtformänderung (Zahlentafel 8, Anlage 21 bis 23) gerade 10% betragen.

Wesentlich für die Berechnung der Bruchspannung ist ferner die Temperatur im Belag im Augenblick der 1. Rißbildung, also der Endpunkt der Berechnung. Da die Abkühlung von der Oberfläche des Belages her einwirkt und der Belag im Augenblick des Risses nicht etwa über den ganzen Querschnitt gleichmässig abgekühlt ist, muss eine Temperatur gewählt werden, die zur Abgrenzung des für die Berechnung benutzten Temperaturintervalles nach unten hin eingesetzt wird. Die Oberflächentemperatur scheidet aus, weil sie ja nur in einem ganz kleinen Teil des Querschnitts auftritt. Die Wahl einer Mitteltemperatur in Form der Temperatur der Meßstelle "Mitte" führt dazu, dass das Temperaturintervall zwischen dem Trennpunkt und der Belagstemperatur beim 1. Riß für beide Schätzmethode des Trennpunktes fast ausschliesslich ein negatives wird. Das bedeutet, dass der Riß schon eingetreten ist, bevor im Verlaufe der Abkühlung das Material gemäß der Schätzung des Trennpunktes überhaupt den Bereich plastischer Verformbarkeit verlassen hat, was wiederum der Annahme widersprechen würde, dass der Riß erst eintritt, wenn die durch Abkühlung erzeugten Zugspannungen durch plastisches Fließen des Materials nicht mehr abgebaut werden können. Eine Spannungsberechnung wäre damit nicht durchführbar.

Beobachtungen an den Prüfbelägen haben nun gezeigt, dass der Riß bei einer Reihe von Materialien von der Oberfläche her mehr oder weniger schnell fortschreitet, bei anderen, z.B. den Strassengußasphalten I bis III, die Belagsunterseite überhaupt nicht erreicht. Aus

diesem Grunde erscheint es gerechtfertigt, als Belagstemperatur, die für die Rißbildung als Mittel massgebend ist, die Temperatur der Meßstelle "oben" einzusetzen.

Die der Spannungsberechnung zugrunde gelegte Längenänderung Δl bzw. deren Verhältnis zur Ausgangslänge ϵ wurde als Summe der Längenänderungen ermittelt, die sich durch Multiplikation der den jeweiligen Temperaturbereichen von 10°C (z.B. $-10/20^\circ\text{C}$) zugehörigen temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten λ mit dem Temperaturintervall Δt ergeben, so dass die Formel

$$\sigma = \epsilon \cdot E = \alpha_t \cdot \Delta t \cdot E$$

dann lautet:

$$\sigma = E \cdot \sum_{\alpha=\alpha_a}^{\alpha=\alpha_n} \alpha \cdot \Delta t$$

Darin ist α_a der Ausdehnungskoeffizient des Temperaturbereichs, in dem der Trennpunkt liegt, während α_n für den Bereich gilt, in dem die Meßstellentemperatur "oben" im Augenblick des 1. Risses liegt. Die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten ist nach den ⁱⁿ Abschnitt 5.1 angegebenen Ergebnissen unbedingt erforderlich, da sie die Grösse der sich ergebenden Spannungen wesentlich beeinflusst.

In der Zahlentafel 25, Anlage 63 sind nun für alle Materialien zwei Spannungsberechnungen durchgeführt, die auf den oben angeführten zwei Möglichkeiten für die Schätzung des Trennpunktes fussen. Beide Möglichkeiten arbeiten mit der Schätzung des vermutlichen Endwertes der gedämpft-elastischen und plastischen Formänderungen nach Abklingen der elastischen Erholung aus dem Verlauf der Verformungs-/Zeit-Kurven (Zahlentafel 8, Anlagen 21 bis 23 und Anlagen 15 bis 20).

Werden die Ergebnisse verglichen (Zahlentafel 25, Spalten 9 und 14), so zeigt sich, dass die Werte recht unterschiedlich sind. Berücksichtigt werden muß dabei, auf welchen Voraussetzungen die Berechnungen fußen bzw. welche Faktoren sie beeinflussen. Sie seien hier noch einmal zusammengefasst:

- (a) Wahl des Trennpunktes,
- (b) Wahl einer mittleren Belagstemperatur,
- (c) auch im Bereich mit weitgehend elastischen Eigenschaften bleiben plastische Einflüsse wirksam,
- (d) die Verformungs-/Zeit-Kurven sind alle mit derselben Verformungskraft von 5 kg/cm^2 aufgestellt, während die Bruchspannung in weitem Rahmen schwanken,
- (e) die Verformungs-/Zeit-Kurven wurden ferner aus Druck- und nicht aus Zugbeanspruchungen aufgestellt, während die Homogenität des Asphaltmaterials keineswegs so groß sein dürfte, dass auf eine völlig gleiche Formänderung aus Zug- und Druckbeanspruchungen geschlossen werden könnte.

Die Berechnung hat damit nur einen bedingten Wert. Sie soll aber dazu benutzt werden, auf anderem Wege eine Bestätigung der Versuchsergebnisse bei der Rißerzeugung an Prüfbelägen zu erbringen, nämlich die Bestätigung dafür, dass die verschiedenen Massen, entsprechend ihrer Zusammensetzung und den Eigenschaften ihrer Komponenten, in Rißneigung und errechneter Spannung dieselbe Tendenz aufweisen.

Dieses ist der Fall. Werden in der Zahlentafel 25, Anlage 63 die mittleren Kühlzeiten bis zur 1. Rißbildung mit den Bruchspannungen, berechnet aus der geschätzten Trennpunktstemperatur, verglichen (Spalten 2 und 14), so ergibt sich in vielen Fällen eine relative Übereinstimmung von Kühlzeit und Bruchspannung.

Die rißfesteste Mastix-Sorte (H 16) hat gleichzeitig die grösste Bruchfestigkeit, während H 12 mit zu geringem Bindemittelgehalt bei rund 40 % Füller und J 16 mit einem weicheren Bindemittel in der Bruchfestigkeit niedriger liegen.

Ähnlich liegen die Werte bei den Strassengußasphalten, bei denen Str.GA. III als der rißfesteste die grösste Bruchfestigkeit besitzt, während Str.GA. I mit zu geringem Füllergehalt und zu hohem Erweichungspunkt des Binde-

mittels sowie Str.GA. II mit zu hohem Bindemittelgehalt kleinere Werte aufweisen.

Dachmastix I, der überhaupt keine einwandfreien Risse zeigte, ist nach dem Verlauf der Verformungs-/Zeit-Kurven (Anlage 13) bzw. der Kurve der Formänderungsanteile in Abhängigkeit von der Temperatur (Anlage 20) erst sehr spät soweit erstarrt, dass kaum noch plastische Formänderungen auftreten. Entsprechend gering ist also die errechnete Zugspannung, da sich die durch die Abkühlung hervorgerufene Zugspannung im Querschnitt eine längere Zeit wieder abbauen konnte, als bei anderen Materialien.

Ein Vergleich des Dachmastix II, der bei einem Füllergehalt von etwa 32 % im Bindemittelgehalt zu hoch liegt, mit dem im Bindemittelgehalt und Erweichungspunkt etwa gleichwertigen H 16 macht klar, dass der im Füllergehalt günstiger liegende H 16 in der mittleren Kühlzeit bis zur 1. Rißbildung auch höher liegen muss. Die erheblich grössere Bruchspannung beim Dachmastix II erklärt sich daraus, dass er gegenüber dem H 16 früher seine plastischen Eigenschaften verliert, bzw. dass die für Dachmastix I angegebene Bruchspannung keine Bruchspannung ist, da noch kein einwandfreier Riß eingetreten war. Die Versuchsbedingungen müssten hier noch verschärft werden.

Die mit der Bedingung: "plastische Formänderung = 10 % der Gesamtformänderung" errechneten Bruchspannungen liegen - soweit sie, bedingt durch die hohen Ausgangswerte, überhaupt ermittelt werden konnten - in der Tendenz ähnlich den eben besprochenen Werte, so dass sich hier eine weitere Besprechung erübrigt.

Abschliessend kann festgestellt werden, dass

- (a) die mit Hilfe der früher gefundenen Werte des Ausdehnungskoeffizienten, des Elastizitätsmoduls und der Abgrenzung der Formänderungsbereiche gegeneinander durchgeführte Berechnung der

Bruchspannungen die Versuchsergebnisse aus der Abkühlung von Prüfbelägen durchaus bestätigen, und dass

- (b) für die Abgrenzung der Formänderungsbereiche gegeneinander die Schätzung der Temperatur im Trennpunkt nach dem Kurvenverlauf der "Verformungsanteile in Abhängigkeit von der Temperatur" die günstigere zu sein scheint.

In Verbindung mit der Frage, in wie weit die hier errechneten Bruchspannungen mit den bei üblichen Prüfmethode gefundenen Werten übereinstimmen, soll noch über einige orientierende Versuche berichtet werden. Die Versuche wurden mit dem Material H 16 durchgeführt.

Die Berechnungen der Zahlentafel 25 ergaben für H 16 folgende Werte:

Zahlentafel 25 Spalte 14	errechnete Bruchspannung in kg/cm^2
9	14
14	25

Zugversuche bei verschiedenen tiefen Temperaturen an Zugkörpern von 4 cm x 4 cm x 26 cm mit einem im Querschnitt quadratischen Mittelteil von etwa 15 cm Länge zwischen den verbreiterten Stabköpfen (in Anlehnung an den von E. Neumann (20) beschriebenen Prüfkörper) führten bei einer Laststeigerung von $0,22 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ zu folgenden Bruchspannungen:

Versuchstemperatur $^{\circ}\text{C}$	Mittlere Bruchspannung kg/cm^2
0	18
-10	26
-20	32
-30	38
-40	38
-50	6

Druckversuche an Probewürfeln 7 cm x 7 cm x 7 cm ergaben bei einer Laststeigerung von 0,22 kg/cm²/sec eine Bruchspannung von:

Versuchstemperatur °C	Druckspannung in kg/cm ² beim	
	1. Knacken	Bruch
-40	50	183

Bemerkenswert ist, dass beim Druckversuch bei so tiefen Temperaturen die ersten Zerstörungen im Material schon erheblich unterhalb der eigentlichen Bruchspannung sich durch Knacken anzeigen und die in diesem Augenblick anliegenden Spannungen von den oben gefundenen Zugspannungen nicht allzuweit entfernt liegen.

7. Zusammenfassende Beurteilung der Versuchsergebnisse

1. Der Ausdehnungskoeffizient besitzt im Bereich weitgehend plastischer Verformbarkeit seinen grössten Wert und sinkt mit zunehmender Erstarrung des Materials ab.. Sein grösster Einfluss auf die Höhe der erzeugten Spannungen würde also im plastischen Bereich liegen, aber eben in diesem plastischen Bereich werden die durch Abkühlung hervorgerufenen Spannungen weitgehend durch plastisches Fliessen wieder abgebaut; er gewinnt also mit sinkender Temperatur immer mehr an Bedeutung, ebenso wie die plastische Verformbarkeit an Bedeutung verliert.

Der Ausdehnungskoeffizient sinkt mit abnehmendem Bindemittelgehalt und steigendem Füllergehalt. Zur Vermeidung der Rißgefahr sollten also, nur von dem Einfluß des Ausdehnungskoeffizienten her gesehen, der Bindemittelgehalt so gering und der Füllergehalt so hoch wie möglich sein.

2. Das Wärmeleitvermögen wird grösser mit fallender Temperatur und verringert seine Temperaturabhängigkeit gleichzeitig mit fallendem Bindemittelgehalt. Da das Wärmeleitvermögen den Temperaturabfall im Querschnitt bei Abkühlung von der Oberfläche her beeinflusst und dieser möglichst gering sein soll, damit die Spannungen möglichst lange durch plastisches Fließen abgebaut werden können, sollte auch hier der Bindemittelgehalt, nur vom Einfluss der Grösse des Wärmeleitvermögens her gesehen, möglichst niedrig sein.
3. Der Elastizitätsmodul kann für die direkte Beurteilung der Rißneigung nicht herangezogen werden, da er nur eine Rechengrösse für die Berechnung der Spannungen darstellt.
4. Die Abgrenzung der elastischen und plastischen Verformungsbereiche gegeneinander ermöglicht es, in Verbindung mit Ausdehnungskoeffizient, Elastizitätsmodul und Rißtemperatur die durch eine Abkühlung im Querschnitt hervorgerufenen Zugspannungen im Augenblick der Rißbildung nachzurechnen.
5. Der mit Hilfe von Wärmeleitzahl und spezifischer Wärme für den Querschnitt rechnerisch ermittelte Temperaturverlauf bei einseitiger Abkühlung wurde durch Messung bestätigt. Damit kann die Kenntnis des Temperaturverlaufs, die für eine Spannungsberechnung erforderlich ist, auch auf rechnerischem Wege gewonnen werden.
6. Laborversuche zur Erzeugung von Rissen in Gußasphalt- und Mastixbelägen nur durch Abkühlung gestatten es, die Rißempfindlichkeit verschiedener Zusammensetzungen zu vergleichen. Sie brachten folgende Ergebnisse:
 - (a) Die Prüfung von 4 Mastixbelägen mit gleichem Kornaufbau, aber unterschiedlichem Bindemittelgehalt und unterschiedlichen Bindemittleigenschaften zeigten, dass es eine optimale Zusammensetzung gibt. Der

Bindemittelgehalt darf nicht zu niedrig und nicht zu hoch sein; der Erweichungspunkt des Bindemittels soll nicht zu niedrig liegen. Er soll aber auch nicht zu hoch sein, wie der Versuch mit Avola zeigt.

- (b) der im Gegensatz zu Strassen- und Dachbelägen nicht auf Rißsicherheit, sondern auf grösste Härte gegen Eindrücke zusammengesetzte Gußasphalt Avola wies auch die grösste Anzahl von Rissen auf. Neben der "Kühlzeit" ist für die Beurteilung einer Mischung also auch die Anzahl der aufgetretenen Risse maßgebend.
- (c) die Strassengußasphalte zeigten, dass eine gut zusammengesetzte Mischung gegenüber schlechteren auch die grösste Rißsicherheit besitzt. Zuviel Bindemittel sowie zu wenig Füller und zu wenig und zu hartes Bindemittel fördern die Rißneigung.
- (d) die Ergebnisse bei den Dachbelägen lassen erkennen, dass eine grosse Bindemittelmenge durchaus kein Schutz vor der Bildung von Rissen ist und dass, wie auch schon bei den Strassengußasphalten gezeigt, eine gut zusammengesetzte Mischung sehr rißfest sein kann.

Diese Laborversuche haben sich als ein gutes Mittel erwiesen, die Neigung von Asphaltmischungen zum Reissen unter starker Abkühlung aufzuzeigen. Zeitpunkt des Auftretens von Rissen, die Rißhäufigkeit und Grösse des gerissenen Querschnittsteiles konnten bestimmt werden. Wenn diese Angaben auch nur innerhalb der gewählten Versuchsbedingungen vergleichenden Wert haben, und diese Versuchsbedingungen mit den Bedingungen in der Praxis nicht völlig übereinstimmen, so bestätigen sie doch einmal die Schlüsse, die bei entsprechender Erfahrung aus der Zusammensetzung der Mischung und den Eigenschaften der Komponenten gezogen werden können,

zum zweiten lassen sie auf Grund tatsächlich erzeugter Risse eine Überprüfung der aus anderen Prüfmethoden gezogenen Schlüsse zu - der Prüfmethoden, in denen nur die im Zusammenhang mit der Rißbildung wichtig erscheinenden Faktoren untersucht wurden.

8. Schlußbetrachtung

Aus der Fülle der Einflüsse, die einen Gußasphalt- oder Mastixbelag zum Reißen bringen können, wurde der Einfluß einseitiger Abkühlung von Belägen herausgegriffen. Da es das Ziel der Untersuchungen von Asphaltmassen auf ihre Rißneigung hin sein sollte, von den reinen Erfahrungswerten zu absoluten Meßwerten über die Festigkeits- und Fließeigenschaften zu kommen, wurden neben der Entwicklung einer Methode, an kleinen Prüfbelägen im Labor Risse zu erzeugen, eine Reihe von Eigenschaften der Asphalte untersucht, mit deren Hilfe eine Nachrechnung der bei der Abkühlung auftretenden Zugspannungen durchzuführen war. Die Schwierigkeit dabei war zu berücksichtigen, dass die Spannungen wegen der plastischen Eigenschaften des Materials während des Vorgangs der Abkühlung z.T. wieder abgebaut werden. Es wurde versucht, diesem Umstand dadurch Rechnung zu tragen, dass für die untersuchten Materialien die Temperatur gesucht wurde, bei der sie hauptsächlich nur noch elastische Eigenschaften besitzen, während die plastischen zu vernachlässigen sind.

Mit Hilfe der in dieser Arbeit angewendeten Methoden sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um folgende Einflüsse der Materialzusammensetzung für Strassengußasphalt- sowie Dachbeläge im Einzelnen zu klären:

Fülleranteil

Bindemittelmenge

Bindemittelart, gekennzeichnet durch

Eindringungstiefe und

Erweichungspunkt,

die vielleicht nach den oben angegebenen Vergleichen zwischen "Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses" und dem PI durch diesen zusammenzufassen wären.

Für weitere Arbeiten ergeben sich folgende Hinweise zur Abänderung oder Vervollkommenung der Versuchsanordnungen:

Bei den Laborversuchen zur Erzeugung von Rissen in Prüfbelägen würde eine Verlängerung des Prüfbelages um etwa 20 bis 30 cm zweckmässig sein, um auch an den ribfesten Materialien wie Strassengußasphalt III und Dachmastix I durch Vergrösserung der Längenänderung zu einwandfrei feststellbaren Rissen zu kommen.

Ferner könnte bei der Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten und bei den Druckversuchen zur Bestimmung der elastischen Formänderung eine Steigerung der Genauigkeit der Versuchsergebnisse dadurch vorgenommen werden, dass die Längenänderung von wenigen tausendstel Millimetern mit der Meßbrücke der Fa. Phillips gemessen werden. Diese Meßvorrichtung würde es vielleicht auch ermöglichen, die Ermittlung der plastischen und elastischen Formänderungen nicht nur im Druck- sondern besonders im Zugversuch, der die wahren Beanspruchungen wiedergeben würde, durchzuführen. Die Messung von kleinsten Formänderungen selbst auf eine Strecke von nur wenigen cm würde es gestatten, bei grösseren Prüfkörpern eine Zone herauszusuchen, in der der Einfluß der Einspannung eines Zugkörpers in einem Prüfgerät kaum noch in Erscheinung tritt. Desgleichen könnten direkte Formänderungsmessungen auf den Prüfbelägen durchgeführt werden, die den Verlauf der Formänderungen auf ihrer Oberfläche bis zum Zeitpunkt des Risses erkennen lassen.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

- (1) K. Fischer, Armierter Gußasphalt, Z.d.oesterr. Ing.- und Arch.Vereins 1931, Heft 11/12 und 13/14.
- (2) L. Heilporn, Recherches relatives aux mastics d'asphalte, préliminaires a l'étude de leur comportement au froid, Brüssel Mai 1951 und
Comportement au froid des mastics d'asphalte, Brüssel, Jan. bis März 1952. Berichte über im Laboratorium der chem. Industrie an der freien Universität Brüssel durchgeführte Forschungsarbeiten.
- (3) P. Herrmann, Tätigkeitsberichte 1929 in den Veröffentlichungen des Hauptausschusses der Zentralstelle für Asphalt- und Teerforschung, Bln. 1937, S. 302
- (4) L.F. Rader, Investigations into the physical properties of bituminous mixtures at low temperatures. Proc.Am.Soc.Test.Mat. 35 (1935), S. 559, ferner in Z.d. internat. ständ. Verbandes d.Strassenkongresse. 1938, Nr.42c, S.323
- (5) S. Hallberg und N. Lindholm, köldspryckor i gjutasfalt, Statens Väginstitut Stockholm, Deddelande 74, 1947
- (6) C.E. Lund Air moisture and heat, their effect on roof covering, Z. National Roofer, Siding and Insulation Contractor, März 1951, S. 12 bis 13 und 31; s.auch Z. Bitumen 12 (1951) S. 105.
- (7) R. Geiger Das Klima der bodennahen Luftschicht, Vieweg 1951, S. 28 ff.
- (8) O. Martin und H. Neumann, Der Deutsche Naturasphalt u. seine Verwendung im Bauwesen, Strass. und Tiefbauverlag, Bln-Pankow 1950, S. 53
- (9) B.S. 988 "Mastic asphalt for roofing (limestone aggregate)" vom 31.11.1941 und
B.S. 1162 "Mastic asphalt for roofing (natural rock asphalt with high bitumen content (6 - 10 %)); s. auch H. Neumann, Dachabdeckungen aus Asphaltmastix und Gußasphalt in England, Z. Das Baugewerbe 30 (1950), Heft 20

- (10) J.Ph. Pfeiffer - P.M. van Doormaal, Betrachtungen
über die rheologischen Eigenschaften
von Asphaltbitumen und Arbeitshypothesen
über die innere Struktur dieser
Produkte, Kolloid-Z. 75 (1936) 95
- (11) P. Herrmann Tätigkeitsbericht der Zentralst. f.
Asph.- u. Teerforsch., für d. Geschäftsjahr
1930 i. d. Veröff. d. Hauptausschuss.
d. Zentralst. f. Asph.-u. Teerforsch.
Allgem. Industrieverl. 1937, S. 364
- (12) R.N.J. Saal in Pfeiffer, the properties of asphaltic
bitumen, Elsevier Amsterdam 1950, S.
90 bis 95
- (13) D.C. Broome the testing of bituminous mixtures,
E. Arnold, London 1949, S. 9
- (14) K. Memmler Handbuch der Kautschuk-Wissenschaften
Hirzel Leipzig 1930
- (15) K.H. Seegers Über die Spannungen in Asphaltbelägen
auf ebenen Stahlblechen bei Strassen-
brücken, Diss. TH Karlsruhe 1952
- (16) L.W. Nijboer, Enige beschouwingen over de eigen-
schappen van bitumen-mineraalaggre-
gaatmengsels in verband met toepassing
van deze in de waterbouw, Z. De Inge-
nieur 64, Nr. 29, 's-Gravenhage, 18.7.
1952, S. 113-122
- (17) A.R. Lee u. A.H.D. Markwick, The mechanical pro-
perties of bituminous surfacing mater-
ials under constant stress, Journ.
Soc.Chem.Ind., Band 56 1937, Trans-
actions S. 146 T.
- (18) J.Ph. Pfeiffer, Observations on the mechanical
testing of bituminous road mixtures,
Journ.Soc.Chem.Ind. 1938 Transactions
and communications, S. 213
- (19) E.v. Angerer, Technische Kunstgriffe bei physi-
kalischen Untersuchungen, Vieweg 1944
- (20) E. Neumann, Der neuzeitliche Strassenbau, Springer
Bln. 1950, S. 383

Rezept für Strassengußasphalt III.

45 %	Naturasphalt-Hartmastix	16 %	= 7,2 %	Bitumen	Ep KS	59 ⁰
2,3 %	Erdölbitumen B	15	= 2,3 %	"	"	56 ⁰
18,0 %	Splitt	3/5 mm				
18,0 %	Splitt	5/8 mm				
16,7 %	Sand	0/3 mm				
100,0 %				9,5 %	Bitumengehalt	

Gemeinsamer Erweichungspunkt KS des Bindemittels:

$$\underline{\underline{\text{Ep KS}}} = \frac{7,2 \cdot 59 + 2,3 \cdot 56}{9,5} = \underline{\underline{58^{\circ}\text{C}}}$$

Rezept für Dachmastix I.

45 %	Naturasphalt-Isoliermastix	22 %	= 10 %	Bitumen	Ep KS	42 ⁰
3 %	Erdölbitumen B	80	= 3 %	Bitumen	Ep KS	33 ⁰
52 %	Sand	0/3 mm				
100 %				13 %	Bitumengehalt	

Gemeinsamer Erweichungspunkt KS des Bindemittels:

$$\text{Ep KS} = \frac{10 \cdot 42 + 3 \cdot 33}{13} = 40^{\circ}\text{C}$$

Kornaufbau und Bindemittelgehalt halten sich an die englische Vorschriften B.S. 988 und 1162, nach denen der Asphaltmastix bei der Analyse folgende Zusammensetzung haben soll:

lösliches Bitumen	11 - 14 %
Mineralanteil	86 - 89 %
davon < 0,09 mm	40 - 50 %
0,09 - 0,2 mm	13 - 16 %
0,2 - 0,4 mm	9 - 10 %
0,4 - 0,6 mm	5 - 7 %
0,6 - 2,0 mm	15 - 25 %
2,0 - 3,0 mm	3 - 5 %
> 3,0 mm	0 %

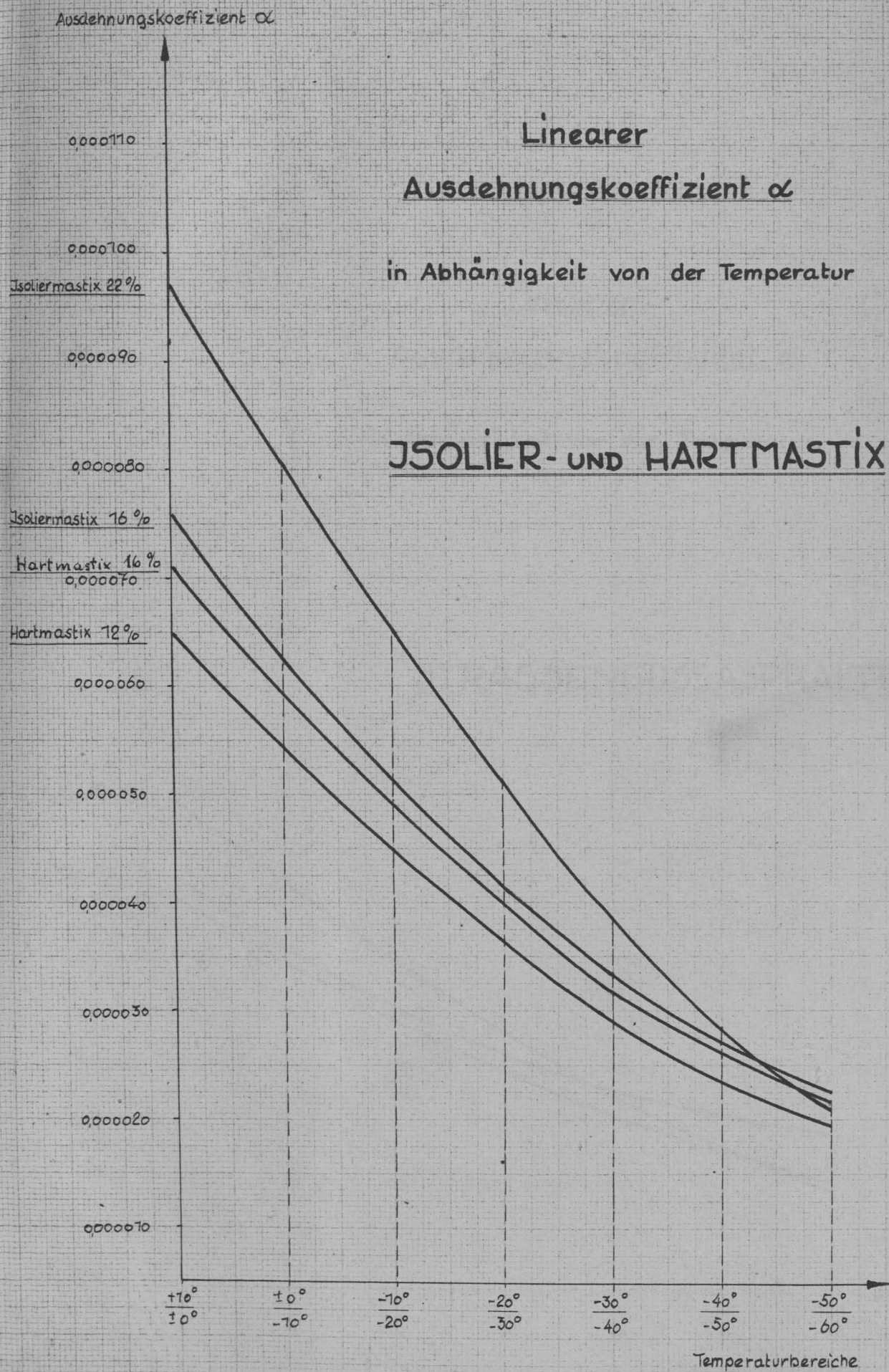
Die geforderte Härtezahl nach Wilson bei 25 °C von ≥ 40 wird bei Anwendung obigen Rezeptes und dieser Kornzusammensetzung des Mineralanteils erreicht.

Zusammensetzung der untersuchten Asphaltmassen

Z A H L E N T A F E L

Material	Naturasphaltmastix				Guß- asphalt Avola	Straßengußasphalt			Dachmastix	
	H 12	H 16	J 16	J 22		I	II	III	I	II
Bindemittelgehalt in Gew.-%	12,2	16	15,9	22	13,5	9,2	11,4	10,1	13,2	15,6
Bindemittleigenschaften										
Eindringungstiefe °Pen	12	22	31	22	5,5	6,4	11	18	24	12
Erweichungspunkt R + K °C	68	70	58	61	90	87	72	76	69	69
Penetrationsindex (P.I.)	-0,3	+1	-0,4	-0,5	+1,2	+1,2	+0,1	+1,5	+1	-0,2
Erweichungspunkt K S °C	56	56	43	48	74	73	57	61	53	53
Brechkpunkt nach Fraass °C	-4	-4	-6	-8	+2	+1	-5	-5	-12	-6
Eindrucktiefe bei 22°C (15°C) mm	2	31	68	(43)	0,9	1,3	11	2,8	28	40
Härtezahl nach Wilson 25 (15) °C	9	23	145	(36)	3	4	17	12	48	103
Kornaufbau der Mineralmasse in Gew.-%										
> 7 mm						0	0	0		0
5 - 7 mm						9,0	8,1	10,0	0	0,3
3 - 5 mm					0	15,4	13,1	13,5	0,2	3,5
2 - 3 mm	0	0	0	0	3,5	8,3	6,2	5,8	3,0	3,7
0,6 - 2 mm	8,6	8,3	15,2	12,1	23,3	17,3	13,3	11,2	19,7	15,4
0,4 - 0,6 mm	14,3	16,1	12,6	11,6	14,6	11,2	11,3	8,5	7,2	9,8
0,2 - 0,4 mm	18,5	15,1	16,0	15,0	15,5	15,2	14,8	11,6	10,1	18,6
0,09 - 0,2 mm	20,4	18,1	7,0	13,4	12,0	9,5	12,1	11,9	14,1	16,9
< 0,09 mm	38,2	42,2	39,2	47,9	31,1	14,1	21,1	27,5	45,7	31,8
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Ausdehnungskoeffizient



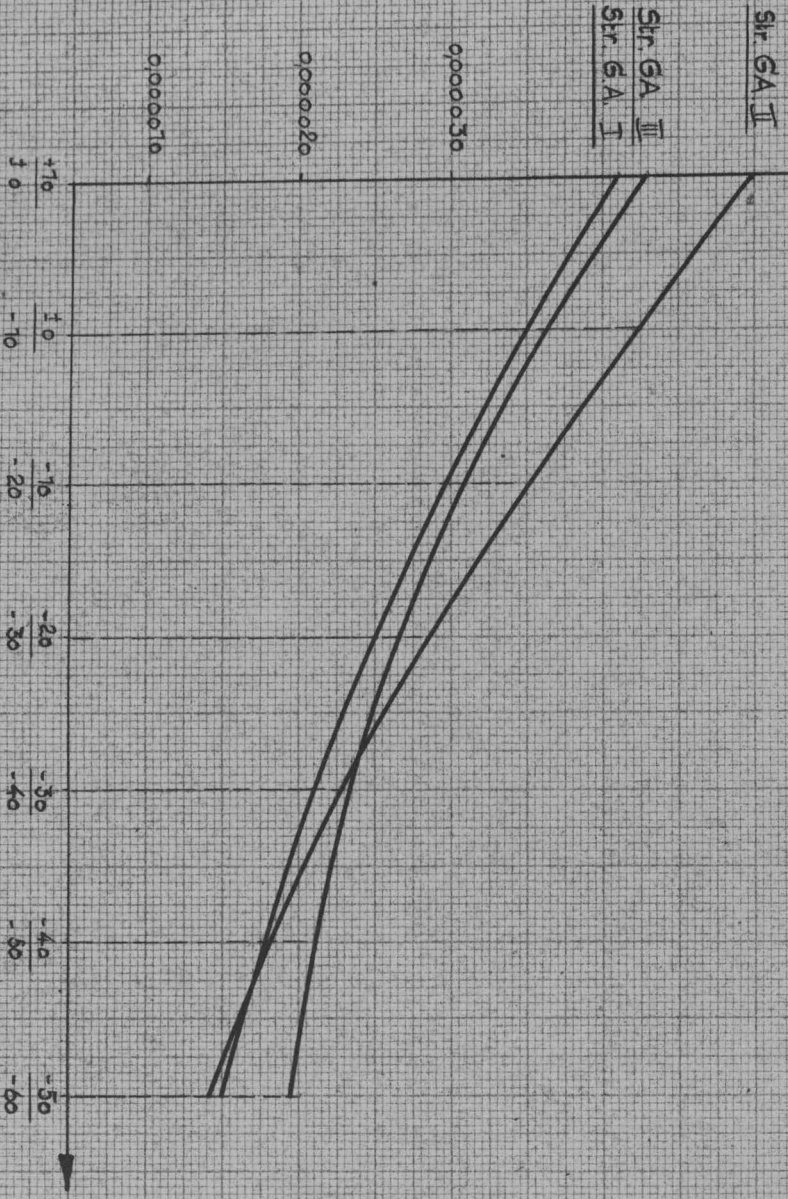
Ausdehnungskoeffizient α

Linearer

Ausdehnungskoeffizient α

in Abhängigkeit von der Temperatur

STRASSENGUSSASPHALTE



Ausdehnungskoeffizient α

0,000110

0,000100

0,000090

Linearer

Ausdehnungskoeffizient α

in Abhängigkeit von der Temperatur

Dachmastix II

0,000070

Dachmastix I

0,000060

Avola

0,000050

0,000040

0,000030

0,000020

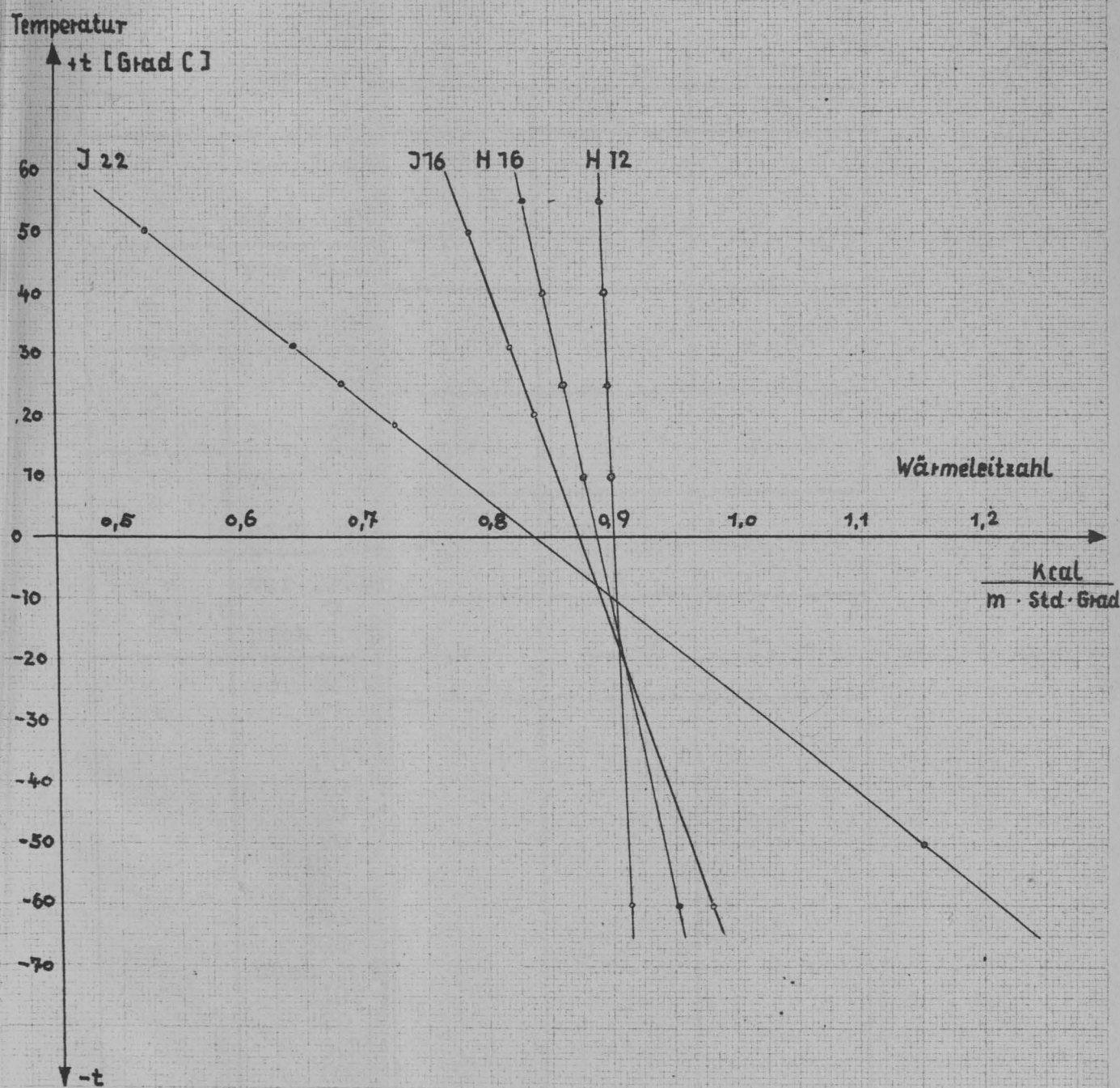
0,000010

DACHMASTIX und
GUSSASPHALT "AVOLA"

+10° ±0° -10° -20° -30° -40° -50°
10° -10° -20° -30° -40° -50° -60°

Temperaturbereiche

Wärmeleitzahl λ in Abhängigkeit von der Temperatur



Messung des Elastizitätsmoduls und der plastischen und elastischen Formänderungen

Z A H L E N T A F E L 5

Material: Str.G.A.III - Versuchstemperatur: - 30 °C - Meßuhr: Genauigkeit 0,001 mm - Berechnungsformel:
 Belastung: 16 kg = 5 kg/cm² bei einer Fläche F = 2 · 16 = 32 cm² - Prismenlänge l = 16 cm.

$$E = \frac{G \cdot l}{\Delta l} = \frac{G}{\epsilon}$$

Versuch Nr.	Zeitpunkt der Ablesung	Ablesung der Meßuhren in mm		Längenänderung Δl in mm			$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$	E-Mod. kg/cm ²	Differenz zwischen An- fangs- und Endablesung bei einem Versuch in mm			Differenz zwischen End- und Anfangsablesung bei 2 auf- einanderfolgenden Versuchen in mm		
		links	rechts	links	rechts	$\frac{l_1 + l_r}{2}$			links	rechts	Mittel	links	rechts	Mittel
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	vor Belast. 1	0,8675	0,327	0,010	0,0095	0,00975	0,000 061	82 100	0,000	0,001	0,0005	-0,0005	-0,001	-0,00075
	nach Entlast.	0,8575	0,3175	0,010	0,0085									
2	vor Belast. 1	0,868	0,327	0,009	0,0095	0,00925	0,000 058	86 500	0,0005	0,000	0,00025	0,000	0,000	0,000
	nach Entlast.	0,859	0,3175	0,0085	0,0095									
3	vor Belast. 1	0,8675	0,327	0,0095	0,009	0,00925	0,000 058	86 500	-0,0005	0,000	-0,00025	0,000	0,000	0,000
	nach Entlast.	0,858	0,318	0,010	0,009									
4	vor Belast. 1	0,868	0,327	0,010	0,009	0,0095	0,000 059	84 200	0,0005	0,0005	0,0005	-0,0005	-0,0005	-0,0005
	nach Entlast.	0,858	0,318	0,0095	0,0085									
5	vor Belast. 1	0,868	0,327	0,010	0,0095	0,00975	0,000 061	82 100	0,000	0,0005	0,00025	0,000	0,000	0,000
	nach Entlast.	0,858	0,3175	0,010	0,009									
6	vor Belast. 1	0,868	0,3265	0,0095	0,0095	0,0095	0,000 059	84 200						
	10	0,8585	0,317	0,010	0,0105	0,0103	0,000 064							
	20	0,858	0,316	0,0105	0,011	0,0107	0,000 067							
	30	0,8575	0,3155	0,011	0,0112	0,0111	0,000 069							
	60	0,857	0,3153	0,0115	0,0116	0,0116	0,000 073							
	90	0,8565	0,3149	0,012	0,012	0,012	0,000 075							
	120	0,856	0,3145	0,0125	0,0122	0,0124	0,000 077							
	180	0,8555	0,3143	0,0128	0,0124	0,0126	0,000 079							
	240	0,8552	0,3141	0,0131	0,0126	0,0129	0,000 081							
	300	0,8549	0,3139	0,0134	0,0128	0,0131	0,000 082							
	nach Entlast.	0,8546	0,3137	0,0039	0,0033	0,0036	0,000 023							
	10	0,8641	0,3232	0,0029	0,0025	0,0027	0,000 017							
	20	0,8651	0,3240	0,0025	0,0023	0,0024	0,000 015							
	30	0,8655	0,3242	0,0021	0,0022	0,0021	0,000 013							
	60	0,8659	0,3243	0,0014	0,0016	0,0015	0,000 009							
	90	0,8666	0,3249	0,0013	0,0015	0,0014	0,000 008							
	120	0,8667	0,3250	0,0012	0,0013	0,0012	0,000 007							
	180	0,8668	0,3252	0,0010	0,0011	0,0010	0,000 006							
	240	0,867	0,3254	0,0007	0,0008	0,0008	0,000 005							
	300	0,8673	0,3257	0,0004	0,0005	0,00045	0,000 003							
			0,8676	0,326										

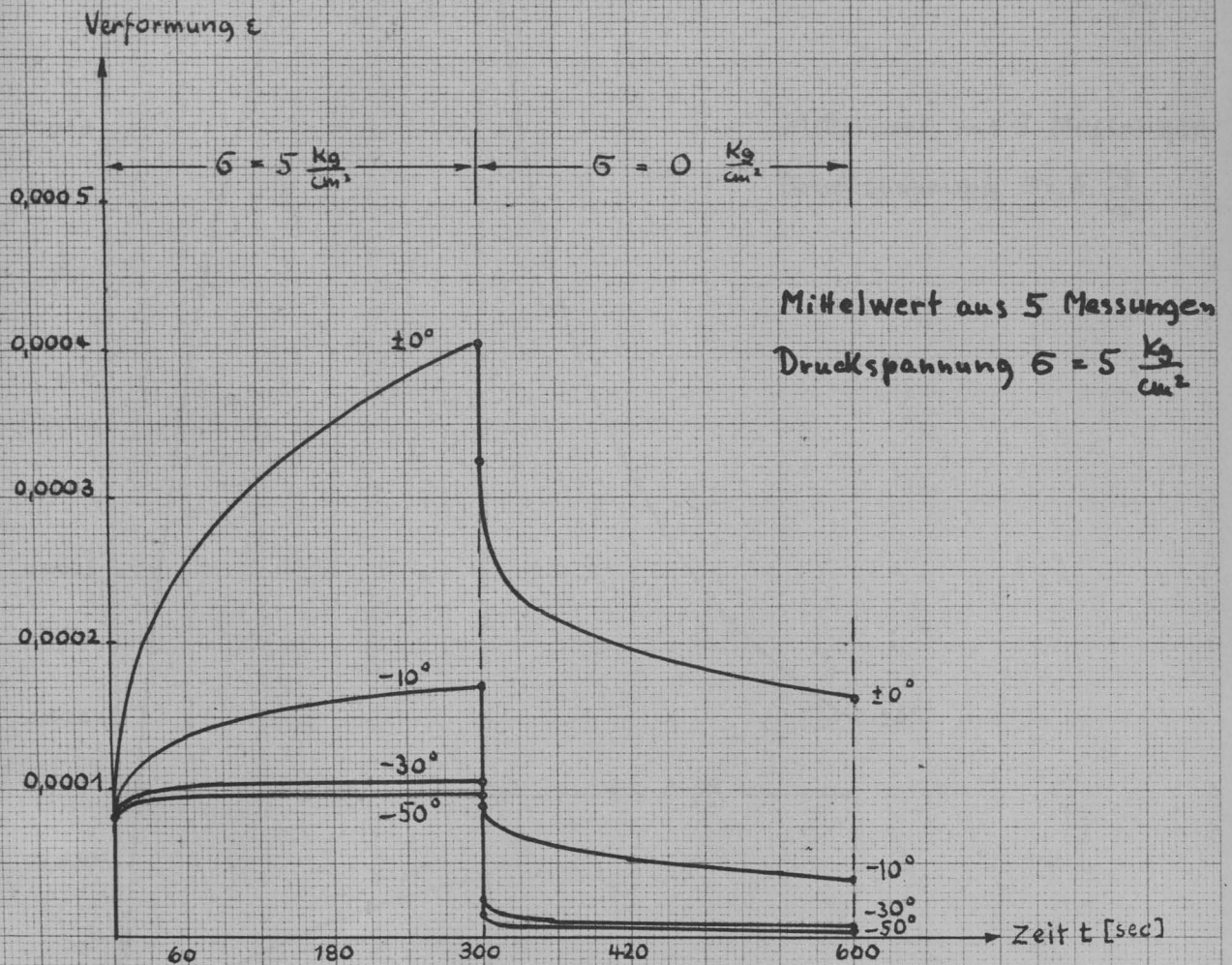
Strassengußasphalt IIIMeßergebnisse und Mittlung des ElastizitätsmodulsZ a h l e n t a f e l 6

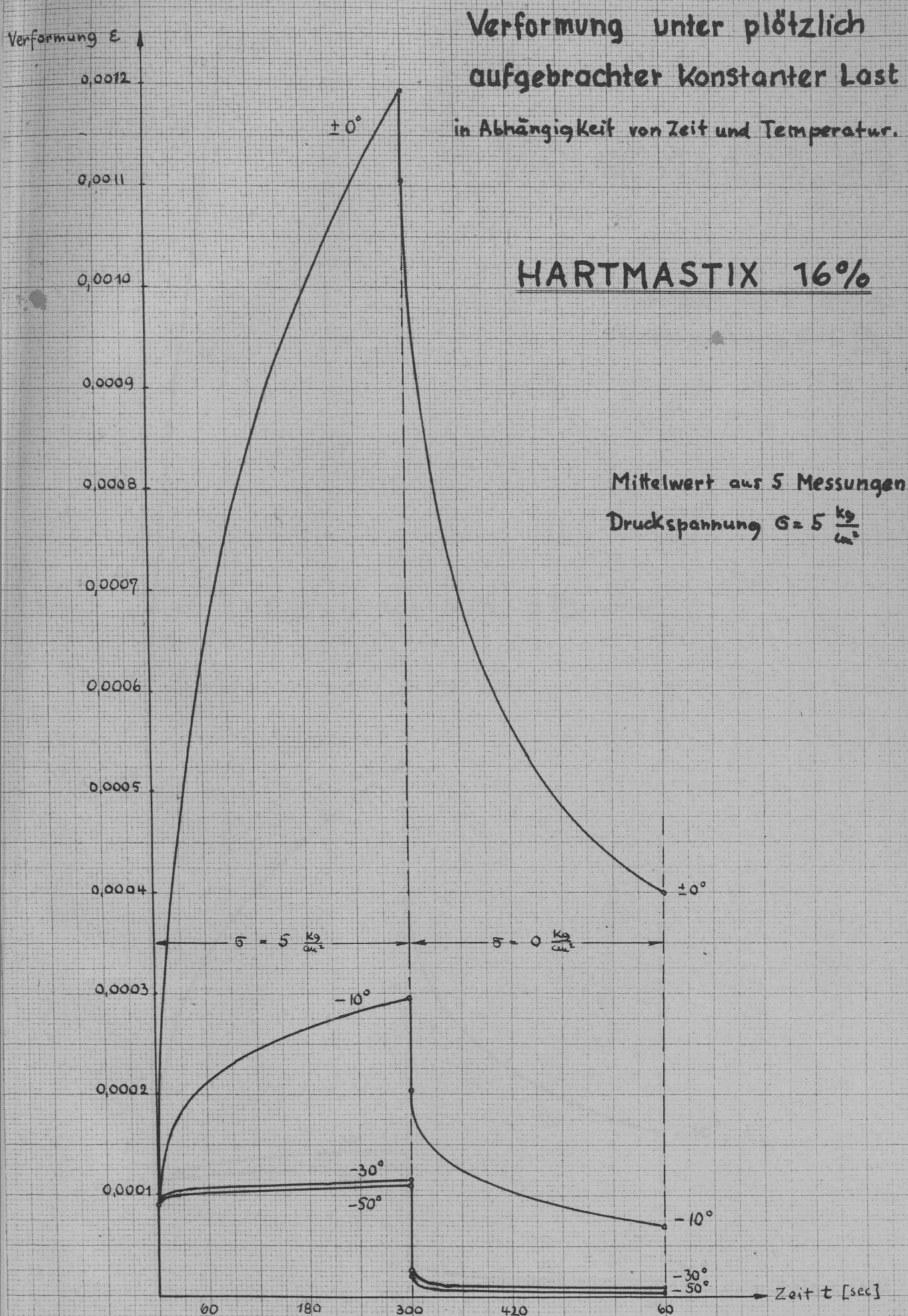
Jede Versuchsreihe (je 1 Doppelprisma) etwa 6 Messungen.
 Maximale Abweichung der streuenden Werte vom Mittel $\pm 8,4 \%$.

Versuchstemperatur - 50 °C					Vers. Reihe	E _{mittel}	E _{mittel}
Versuchsreihe						1	2
1	2	3	4	5			
80 000	86 500	78 000	80 000	78 000			
86 500	86 500	80 000	78 000	91 300			
80 000	78 000	84 200	82 100	86 500			
84 200	86 500	88 800	82 100	86 500	1	83 200	
84 200	86 500	86 500	82 100	86 500	2	84 700	
84 200	84 200	91 500	82 100	84 200	3	84 800	
499 100	508 200	508 800	486 400	513 000	4	81 100	
: 6 =	: 6 =	: 6 =	: 6 =	: 6 =	5	85 500	
83 200	84 700	84 800	81 100	85 500		419 300	
						: 5 =	83 860
Versuchstemperatur - 30 °C					1	86 100	
					2	79 900	
					3	83 900	
					4	84 700	
					5	85 300	
						419 900	
						: 5 =	83 980
" - 10 °C					1	82 100	
					2	83 100	
					3	86 400	
					4	85 700	
					5	83 900	
						421 200	
						: 5 =	84 240
" ± 0 °C					1	64 300	
					2	72 700	
					3	69 600	
					4	64 900	
					5	72 100	
Dieser Wert wird für die Mittlung nicht mit herangezogen, da beim Str.G.A. III bei 0 °C schon plastische Formänderungen mitgemessen wurden.						343 600	
						: 5 =	68 720
							252 080
							: 3 =
Gesamtmittel des Elastizitätsmoduls in kg/cm ² :							84 000

Verformung unter plötzlich
aufgebrachter konstanter Last
in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur

HARTMASTIX 12 %



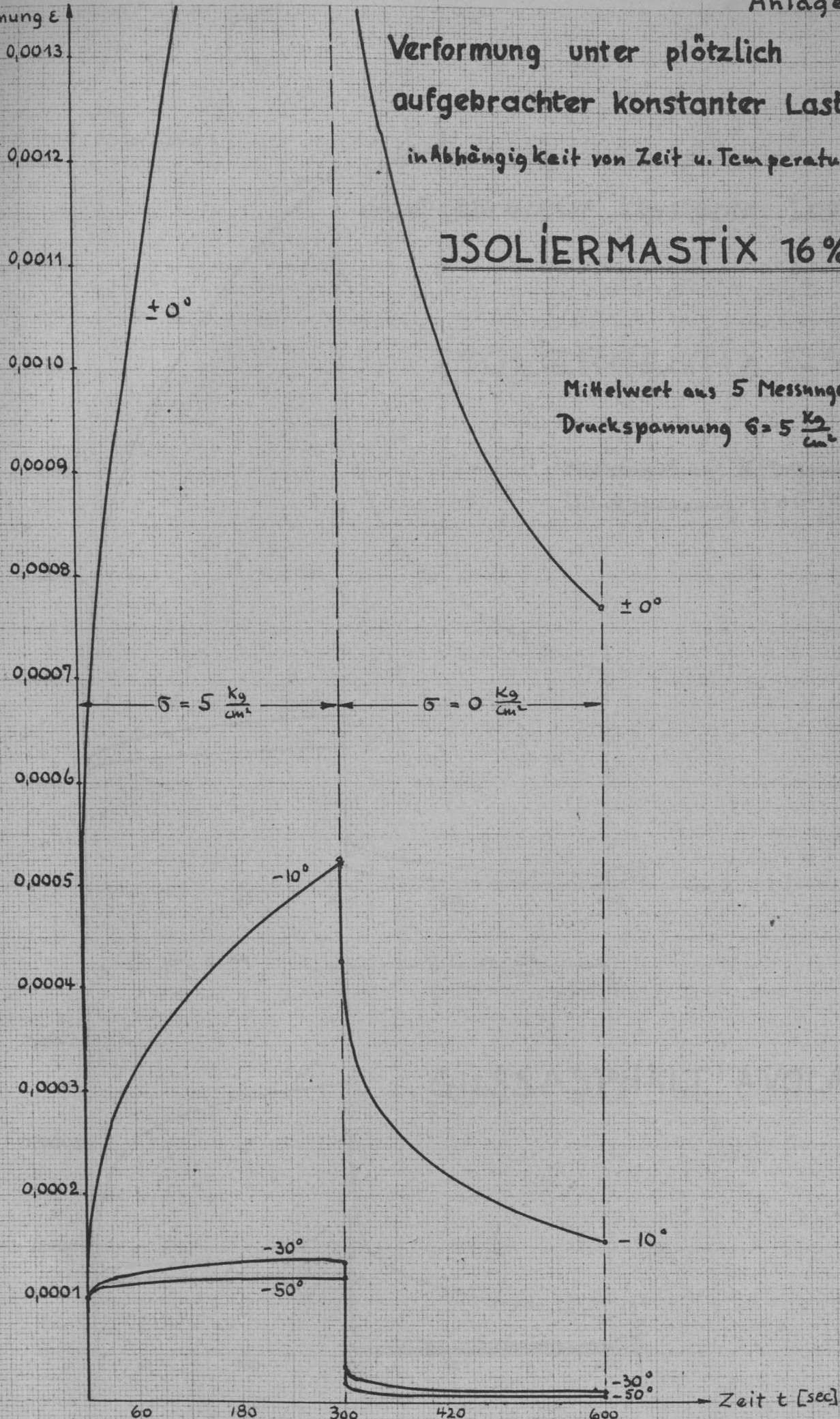


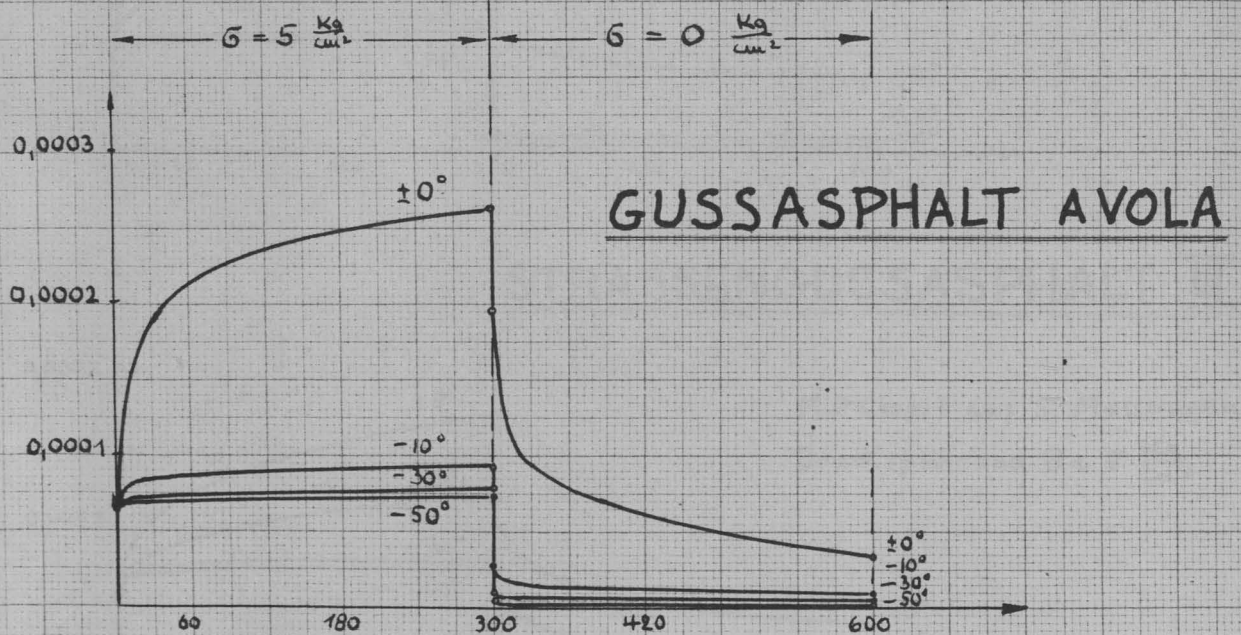
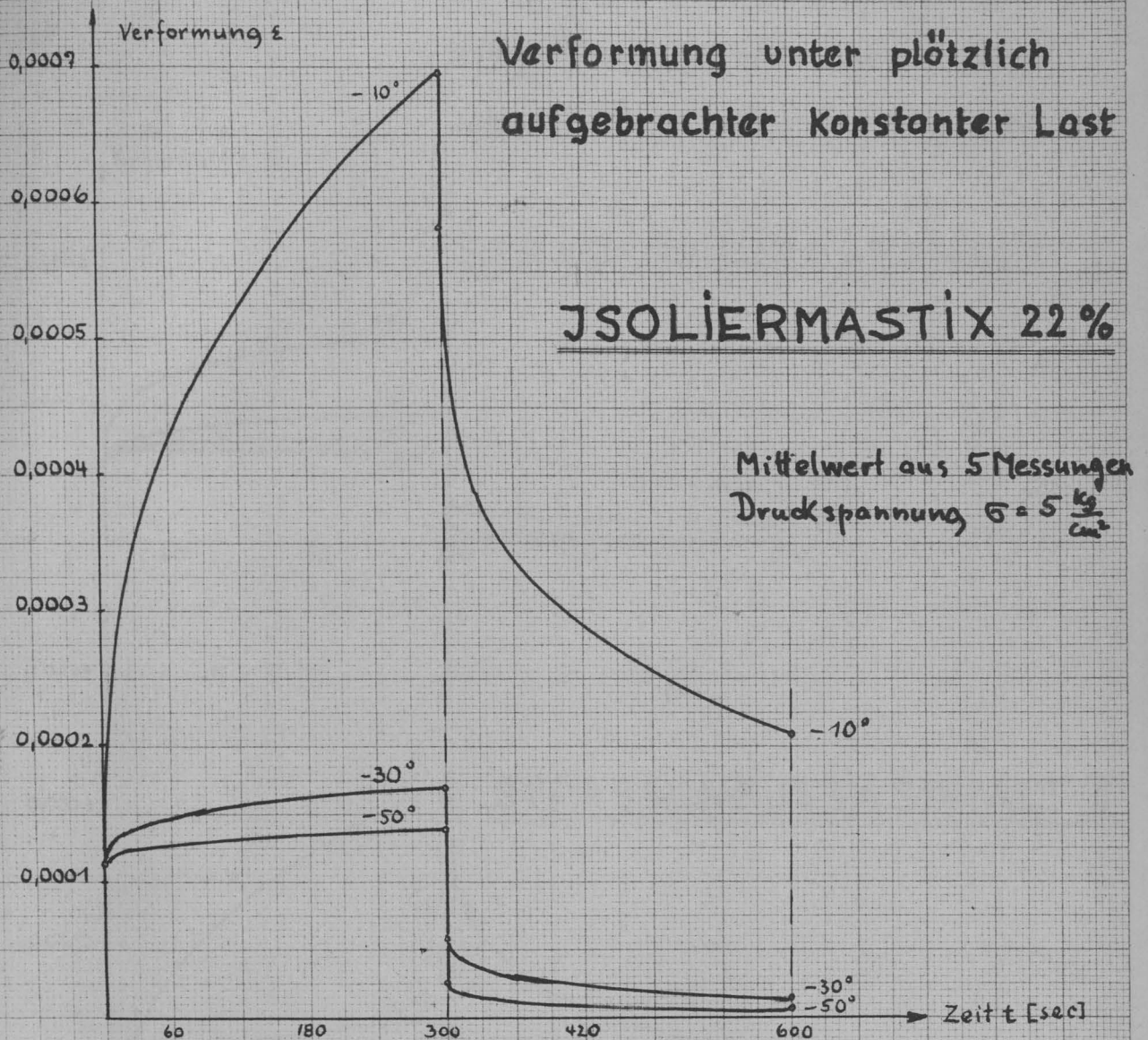
Verformung ϵ

Verformung unter plötzlich
aufgebrachter konstanter Last
in Abhängigkeit von Zeit u. Temperatur

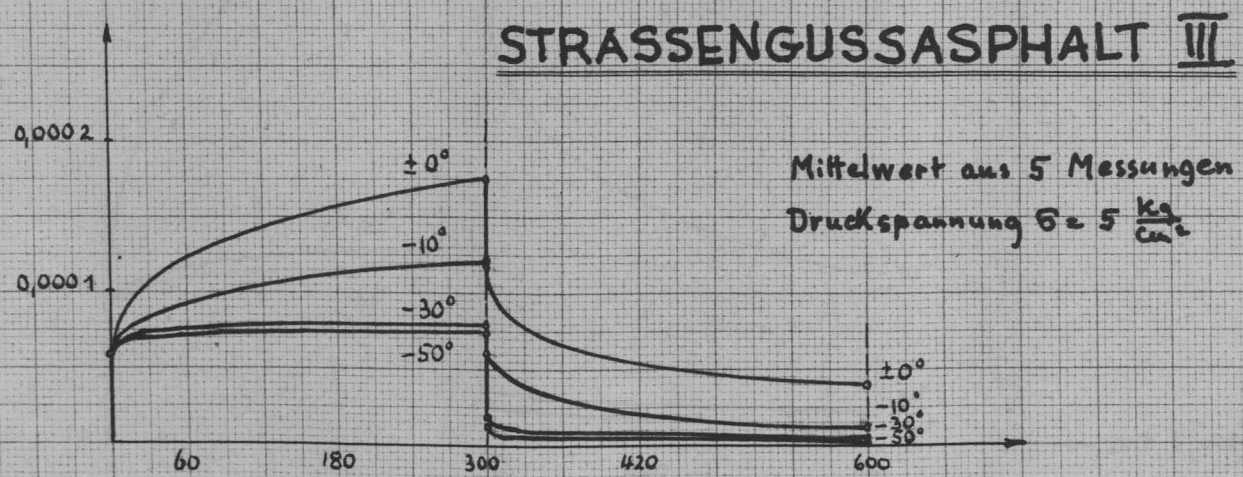
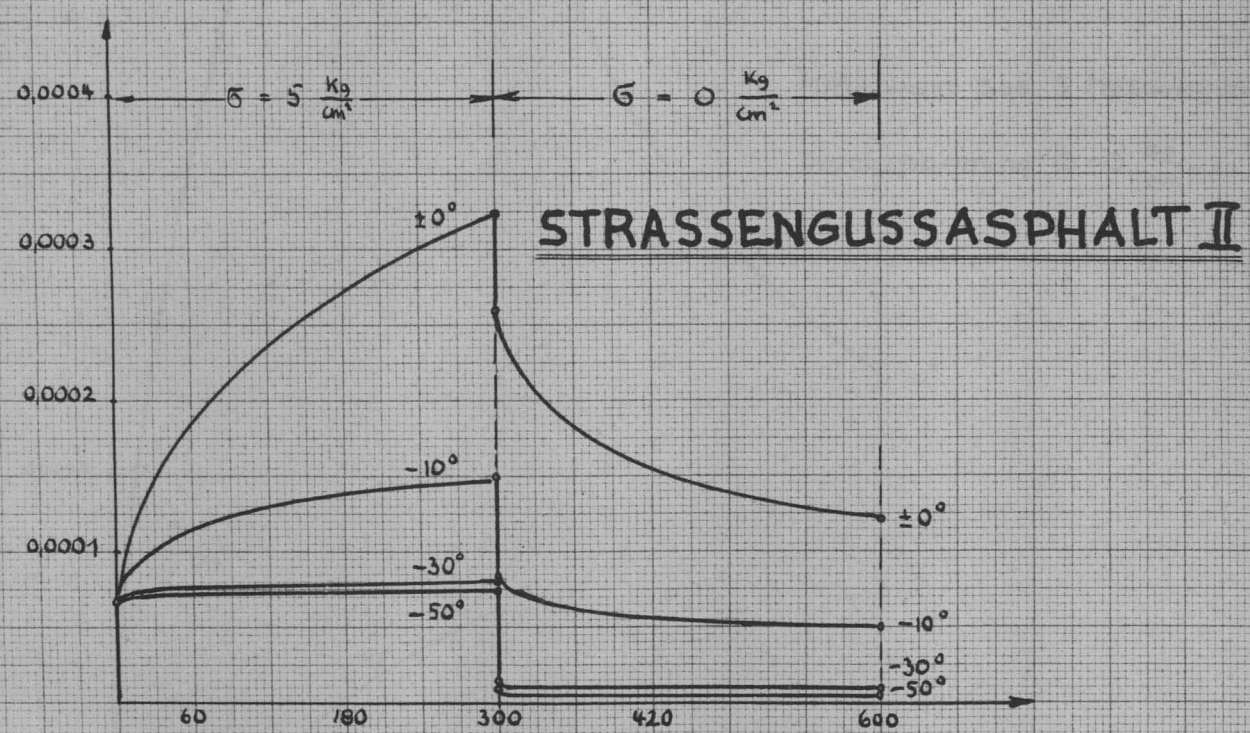
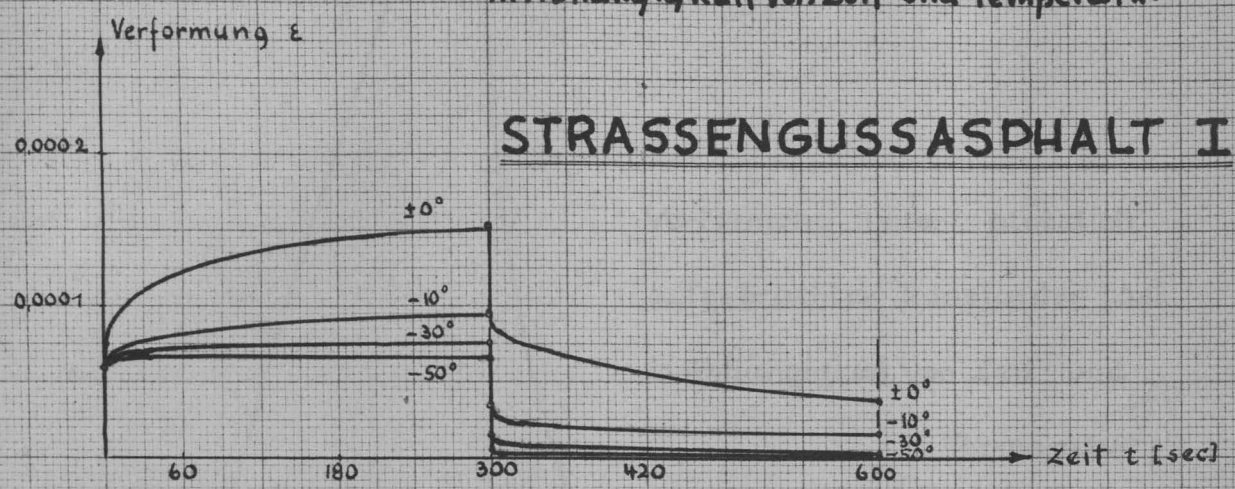
JSOLIERMASTIX 16%

Mittelwert aus 5 Messungen
Druckspannung $\sigma = 5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$





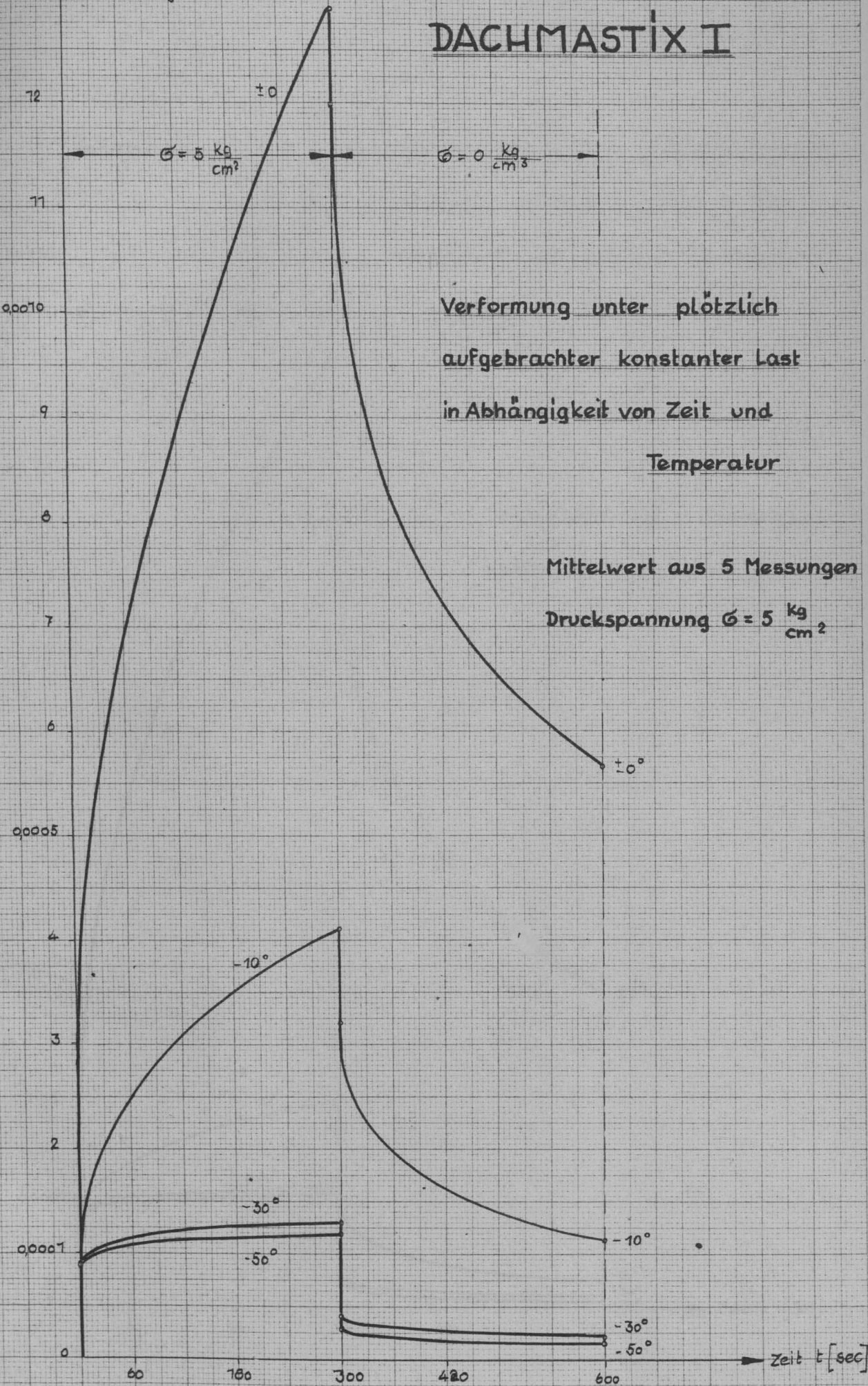
Verformung unter plötzlich
aufgebrachter Konstanter Last
in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur



Verformung

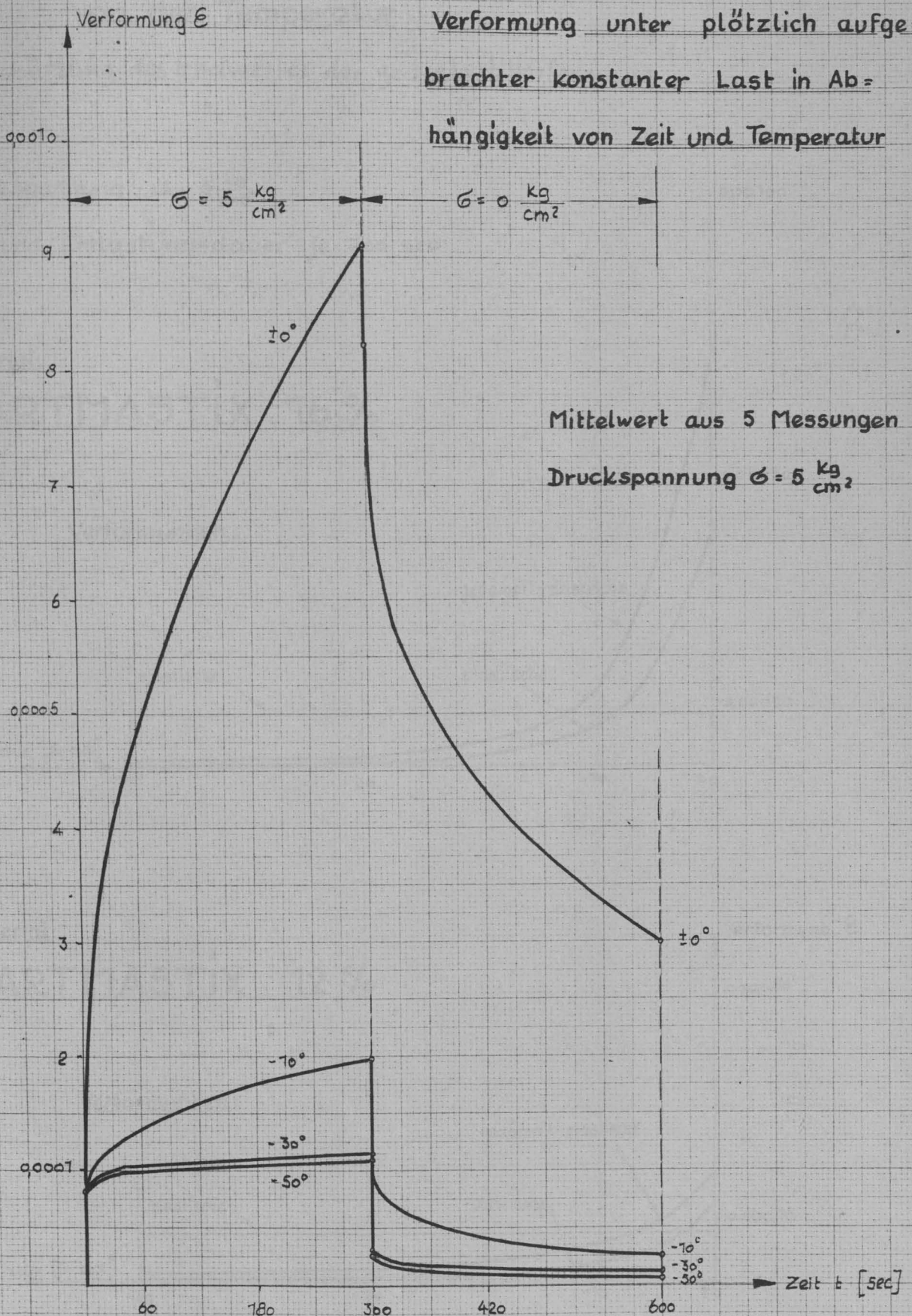
13 ↑ Verformung ϵ

DACHMASTIX I



DACHMASTIX II

Verformung unter plötzlich aufgebrachter konstanter Last in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur



Verformungsanteile in Abhängigkeit von der Temperatur

nach Schätzung des Endwertes der ged-relast. Verformung

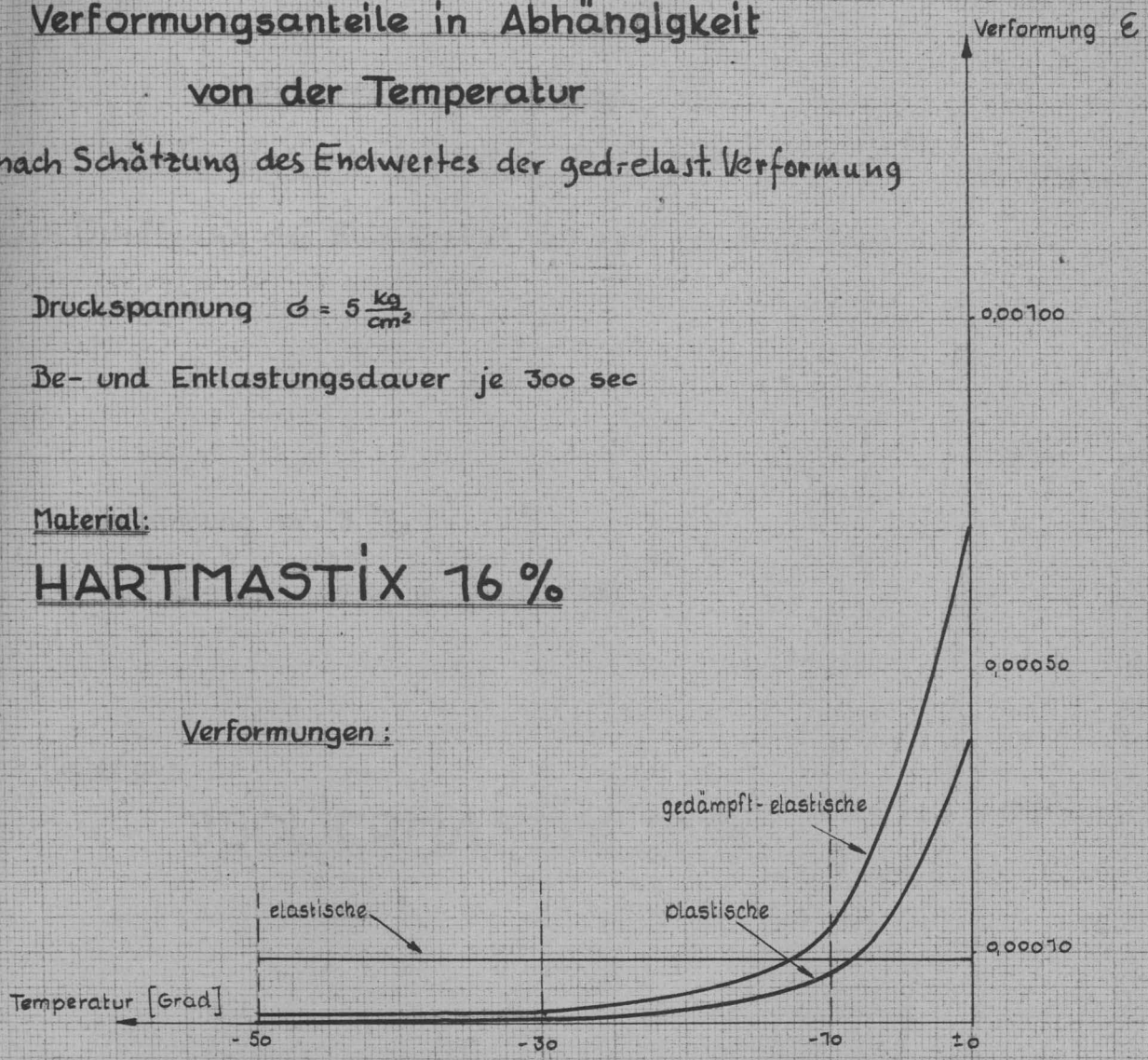
Druckspannung $\sigma = 5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Be- und Entlastungsdauer je 300 sec

Material:

HARTMASTIX 16 %

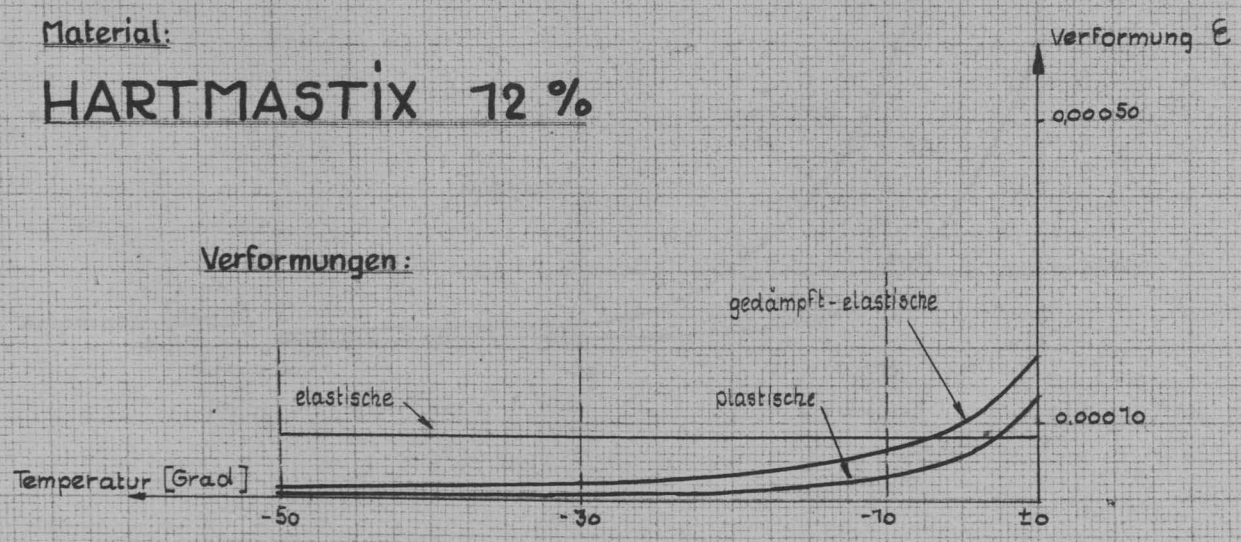
Verformungen:



Material:

HARTMASTIX 12 %

Verformungen:



Verformungsanteile in Abhängigkeit von der Temperatur

nach Schätzung des Endwertes der ged.-elast. Verformung

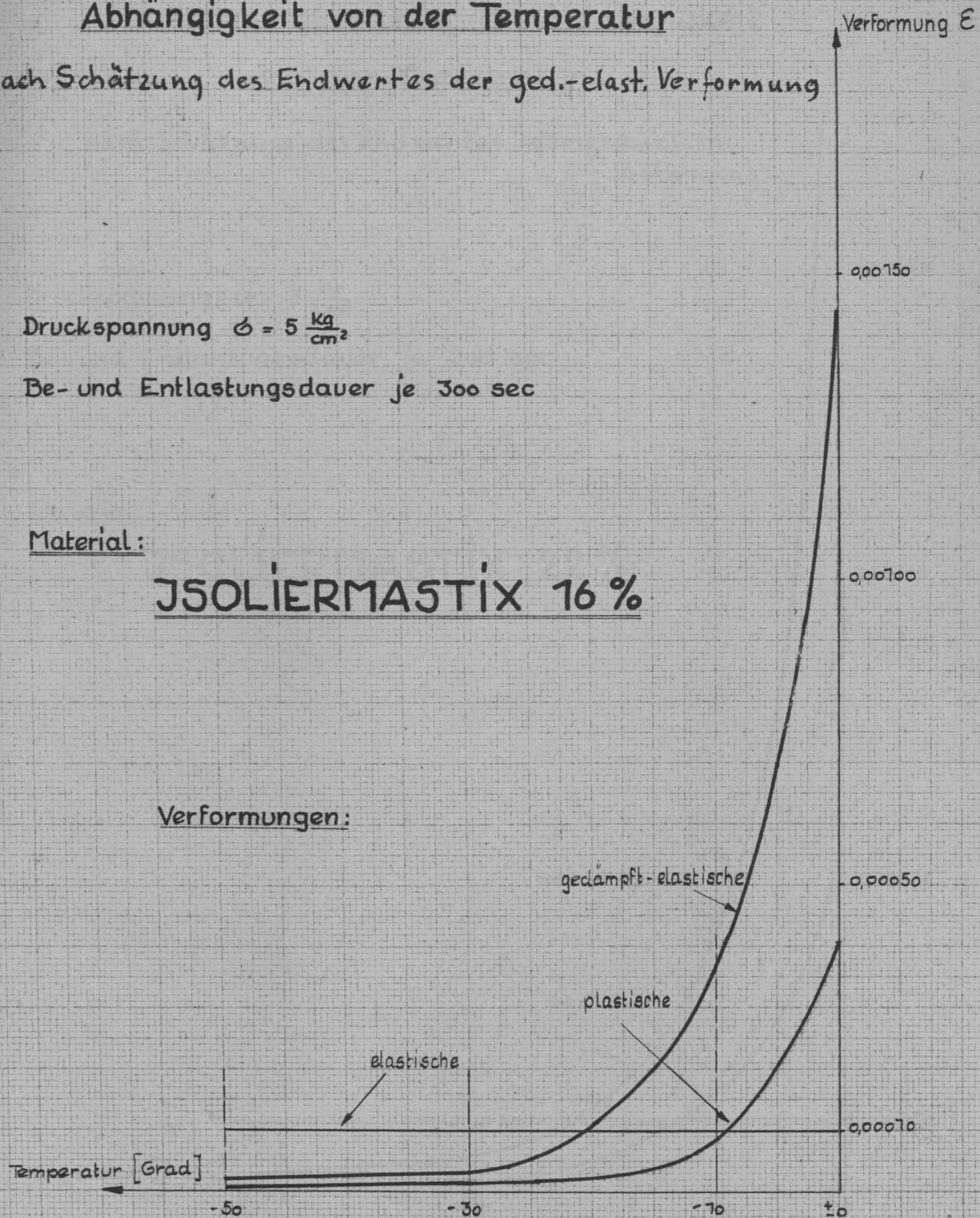
Druckspannung $\sigma = 5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Be- und Entlastungsdauer je 300 sec

Material:

JSOLIERMASTIX 16 %

Verformungen:



Verformungsanteile in Abhängigkeit von der Temperatur

nach Schätzung des Endwertes der ged.-elast.
Verformung

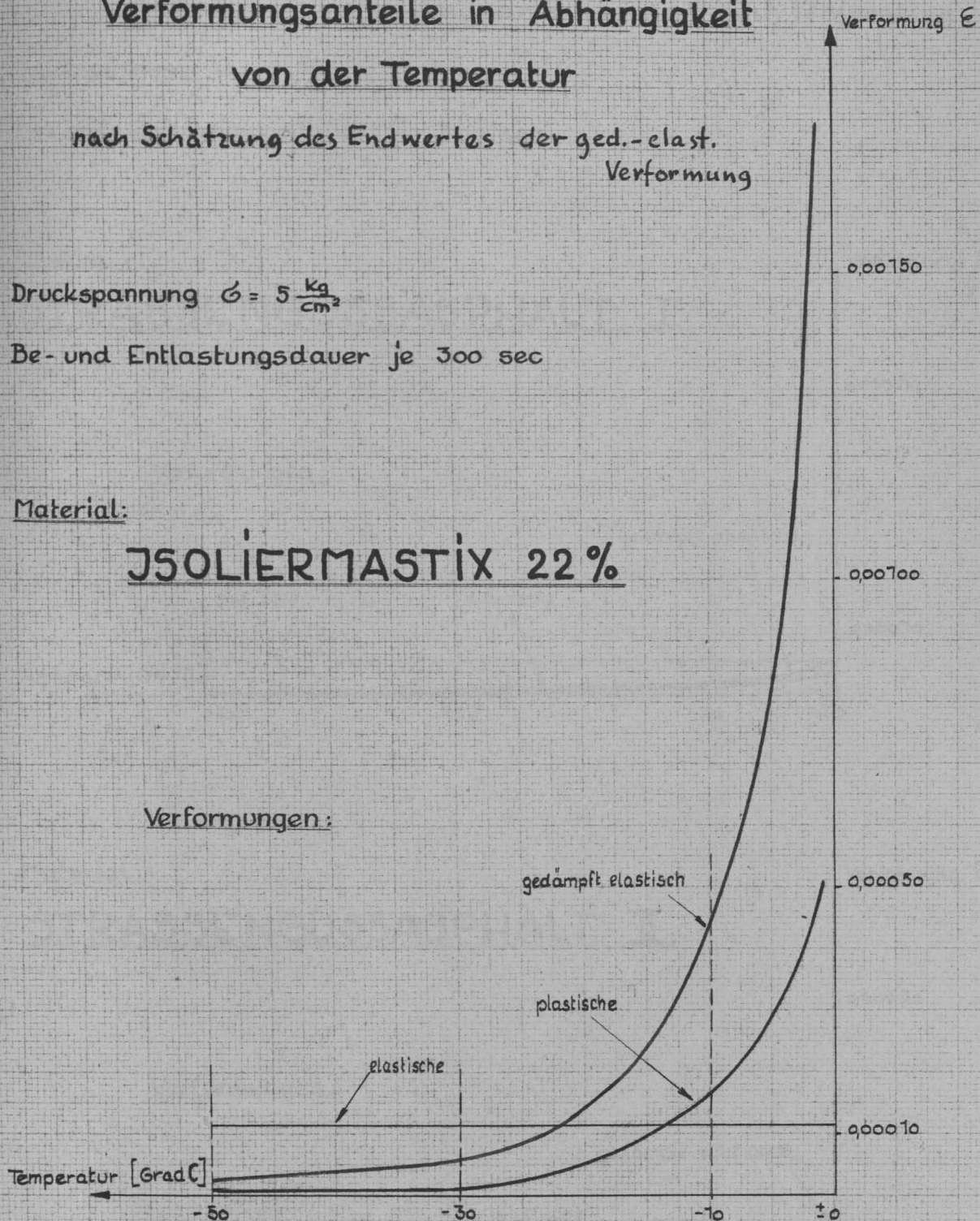
Druckspannung $\sigma = 5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Be- und Entlastungsdauer je 300 sec

Material:

JSOLIERMASTIX 22%

Verformungen:



Verformungsanteile in Abhängigkeit von der Temperatur

nach Schätzung des Endwertes der ged.-elast. Verformung

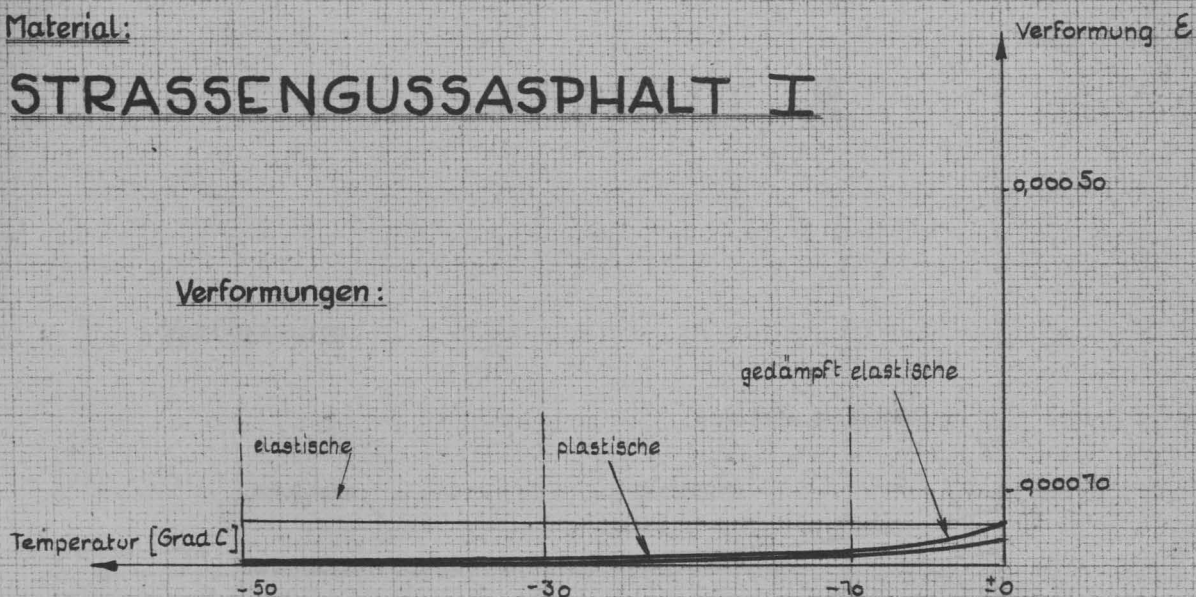
Druckspannung $\sigma = 5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Be- und Entlastungsdauer je 300 sec

Material:

STRASSENGUSSASPHALT I

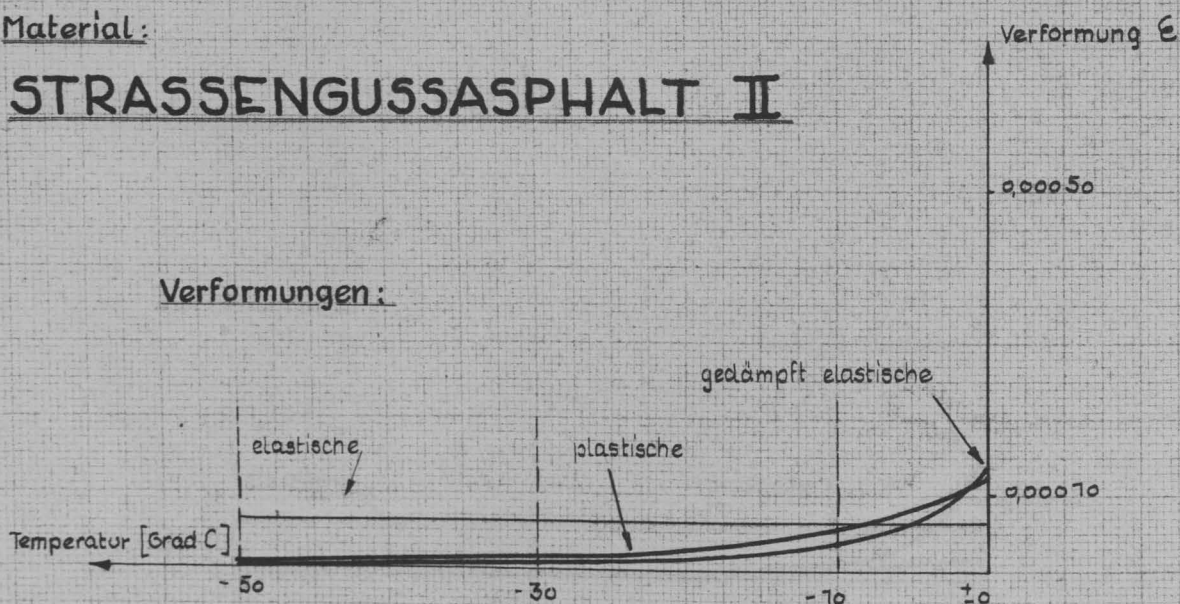
Verformungen:



Material:

STRASSENGUSSASPHALT II

Verformungen:



Verformungsanteile in Abhängigkeit von der Temperatur

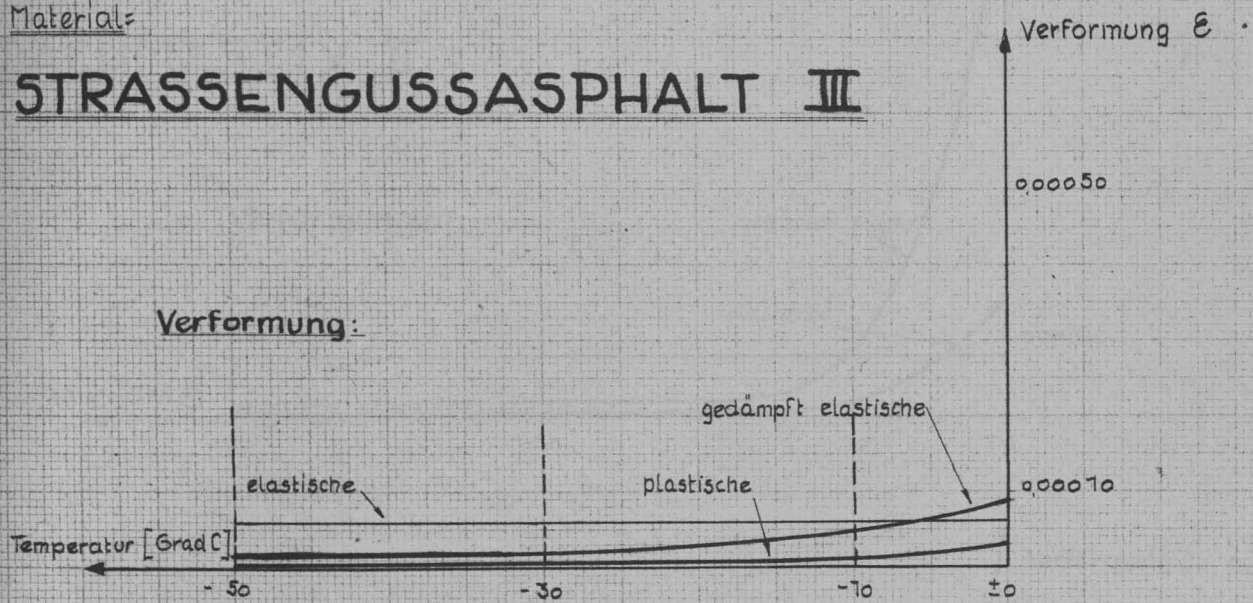
nach Schätzung des Endwertes der ged.-elast. Verformung

Druckspannung $\sigma = 5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Be- und Entlastungsdauer je 300 sec

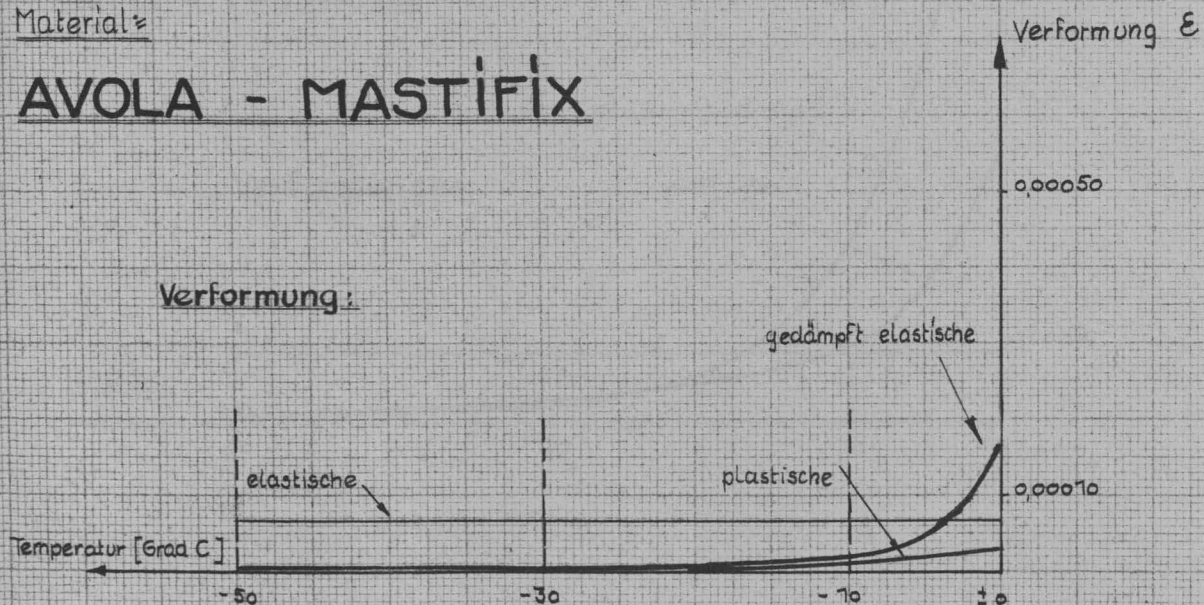
Material:

STRASSENGUSSASPHALT III



Material:

AVOLA - MASTIFIX



Verformungsanteile in Abhängigkeit von der Temperatur

nach Schätzung des Endwertes der ged.-elast. Verformung

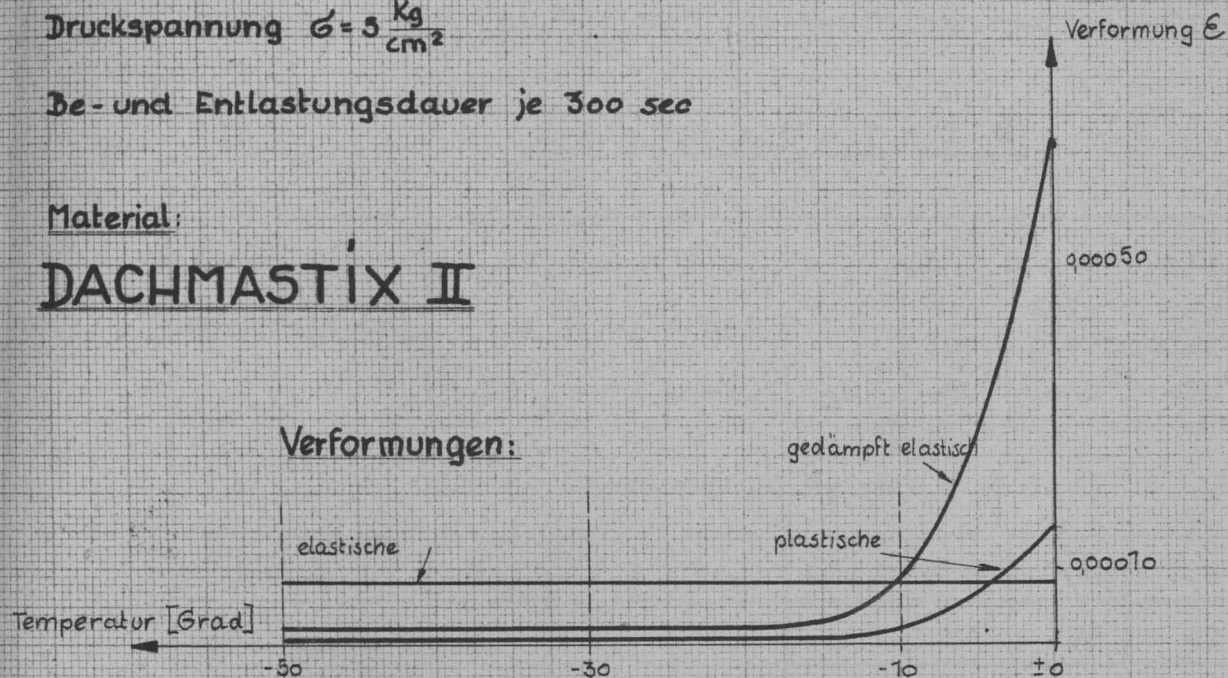
Druckspannung $\sigma = 5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Be- und Entlastungsdauer je 300 sec

Material:

DACHMASTIX II

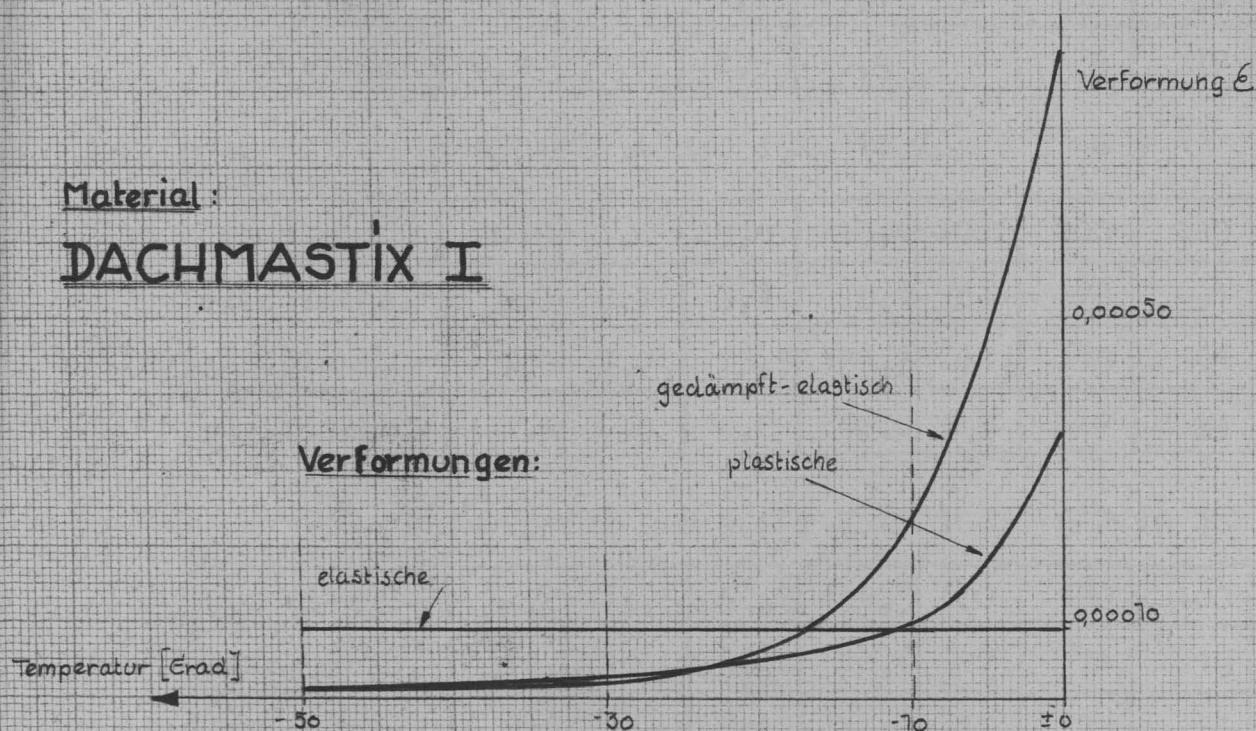
Verformungen:



Material:

DACHMASTIX I

Verformungen:



Formänderungsanteileunter einer konstanten Last von 5 kg/cm²

Als Werte für gedämpft-elastische und plastische Formänderungen sind diejenigen angegeben, die sich nach der Entlastung bei Schätzung des vermutlichen Endwertes nach Abklingen der elastischen Erholung (= gedämpft-elastische Formänderung) aus dem Verlauf der Verformungs-/Zeit-Kurve ergaben

Z a h l e n t a f e l 8

Formänderung	F o r m ä n d e r u n g s a n t e i l e							
	$\epsilon \cdot 10^{-5}$ bei				ϵ in % der			
	-50°	-30°	-10°	±0°	Gesamtformänderung bei			
	-50°	-30°	-10°	±0°	-50°	-30°	-10°	±0°
H A R T M A S T I X 12 % (K 12)								
Gesamt-	9,7	11,7	17,2	40,7	100	100	100	100
elastische	8,1	8,1	8,1	8,1	84	76	47	20
ged.elast.	1,2	2,1	6,2	19,1	12	18	36	47
plastische	0,4	0,7	2,9	13,4	4	6	17	33
H A R T M A S T I X 16 % (H 16)								
Gesamt-	10,9	11,6	29,4	119,4	100	100	100	100
elastische	9,1	9,1	9,1	9,1	83	78	31	8
ged.elast.	1,5	1,7	13,5	70,3	14	15	46	59
plastische	0,3	0,8	6,8	40,0	3	7	23	33
I S O L I E R M A S T I X 16 % (J 16)								
Gesamt-	12,2	13,5	52,5	194,3	100	100	100	100
elastische	10,0	10,0	10,0	10,0	87	74	19	5
ged.elast.	1,8	3,0	34,1	143,8	15	22	65	74
plastische	0,4	0,5	8,4	40,8	3	4	16	21

Formänderungsanteile unter einer konstanten Last von 5 kg/cm^2

Z a h l e n t a f e l 8 (1. Fortsetzung)

Formänderung	Formänderungsanteile							
	10^{-5}				in % der Gesamtformänderung bei			
	-50°	-30°	-10°	$\pm 0^\circ$	-50°	-30°	-10°	$\pm 0^\circ$
I S O L I E R M A S T I X 22 % (J 22)								
Gesamt-	14,1	17,2	69,7	-	100	100	100	100
elastische	11,4	11,4	11,4	-	81	66	16	(4)
ged.-elast.	2,3	4,6	41,8	-	16	27	60	(76)
plastische	0,4	1,2	16,7	-	3	7	24	(40)
D A C H M A S T I X I (Dachm. I)								
Gesamt-	11,9	13,2	41,2	129,1	100	100	100	100
elastische	9,1	9,1	9,1	9,1	76	69	22	7
ged.-elast.	1,3	1,9	23,1	85,0	11	14	56	66
plastische	1,5	2,2	9,0	35,0	13	17	22	27
D A C H M A S T I X II (Dachm. II)								
Gesamt-	11,1	11,4	19,7	90,7	100	100	100	100
elastische	8,3	8,3	8,3	8,3	75	73	42	9
ged.-elast.	2,2	2,4	8,9	66,9	20	21	45	74
plastische	0,6	0,7	2,5	15,5	5	6	13	17

Formänderungsanteile unter einer konstanten Last von 5 kg/cm²

Z a h l e n t a f e l 8 (2. Fortsetzung)

Formänderung	Formänderungsanteile							
	$\epsilon \cdot 10^{-5}$ bei				ϵ in % der Gesamtformänderung bei			
	-50°	-30°	-10°	±0°	-50°	-30°	-10°	±0°
S T R A S S E N G U S S A S P H A L T I (Str.G.A. I)								
Gesamt-	6,6	7,5	9,7	15,3	100	100	100	100
elastische	6,0	6,0	6,0	6,0	91	79	63	39
ged.-elast.	0,5	1,0	2,0	5,9	7	13	21	39
plastische	0,1	0,6	1,5	3,4	2	8	16	22
S T R A S S E N G U S S A S P H A L T II (Str.G.A. II)								
Gesamt-	7,5	8,1	15,0	32,5	100	100	100	100
elastische	6,5	6,5	6,5	6,5	87	81	44	20
ged.-elast.	0,3	0,6	3,3	13,7	4	7	21	42
plastische	0,7	1,0	8,2	12,3	9	12	35	38
S T R A S S E N G U S S A S P H A L T III (Str.G.A. III)								
Gesamt-	7,8	8,1	12,0	17,7	100	100	100	100
elastische	6,0	6,0	6,0	6,0	77	73	49	34
ged.-elast.	1,5	1,9	4,9	8,8	20	24	41	50
plastische	0,3	0,4	1,5	4,0	3	3	9	17
G U S S A S P H A L T " A V O L A - M A S T I F I X " (Avola)								
Gesamt-	7,3	7,8	9,4	26,3	100	100	100	100
elastische	6,6	6,6	6,6	6,6	90	84	70	25
ged.-elast.	0,6	0,8	1,9	16,8	8	10	20	64
plastische	0,1	0,5	0,9	2,9	2	6	10	11

Rißbildung an Prüfbelägen

Zusammenstellung der Mittelwerte aller geprüften Materialien

Z a h l e n t a f e l 9

Abkühlung	s c h n e l l										langsam
Material	Naturasphaltemastix				Gußasph.	Straßengußasphalt			Dachmastix		Asphaltmastix
	H 12	H 16	J 16	J 22	Avola	I	II	III	I	II	H 16
O b e r f l ä c h e n r i s s e											
Kühlzeit bis zum Auftreten von Oberflächenrissen, in Min.	13	13	11	12	13	16	17	20	30	14	-
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp., °C	-26	-26	-19	-22	-26	-36	-40	-50	-50	-29	-
Temp.an den Meßstellen im Asphalt	oben + 1 + 11	oben + 1 + 11	oben - 6 + 4 + 13	oben - 8 + 4 + 13	oben - 11 + 1 + 11	oben - 16 - 2 + 9	oben - 17 - 5 + 8	oben - 25 - 10 + 4	oben - 36 - 18,5 - 4	oben - 13 - 1 + 10	oben - - -
H a u p t r i s s e											
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	18	24	21	18	26	26	27	(30)	(36)	22	200
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp., °C	-43	-50	-50	-42	-50	-50	-50	(-50)	(-50)	-50	-46
Temperatur an den Meßstellen im Asphalt, °C	oben - 21 - 6,5 + 6	oben - 31,5 - 13 + 1	oben - 26 - 11 + 4,5	oben - 21 - 6,7 + 6	oben - 33 - 15 - 1	oben - 33 - 15 - 1	oben - 34 - 16 - 2	oben (-36) (-18,5) (-4)	oben (-39) (-13) (-8)	oben - 27 - 12 + 2,5	oben - 40 - 29 - 14,5
Temperatur an der Belagsunterseite, °C	+ 10	+ 5	+ 10	+ 10	+ 3	+ 3	+ 2	(- 1)	(- 5)	+ 7	- 11
Temp.Gefälle zwischen Ober- u. Unterseite des Asphaltbelages, in °C	53	55	60	52	53	53	52	(49)	(47)	57	35
Durchschnittstemp. = Temp.Meßst.Mitte, °C	- 6,5	- 13	- 11	- 6,5	- 15	- 15	- 16	(- 18,5)	(- 23)	- 12	- 29
Anzahl der Haupt- risse un- vollständig	1 - 2	1 - 2	1 - 2	1 - 2	3 - 5	1	1	(1)	(0 - 1)	-	2
vollständig	1 - 2	1	0 - 1	1	0 - 1	-	-	-	-	1	1 - 2

Rißbildung an Prüfbelägen

schnelle Abkühlung (70 °C in 20 Minuten)

Material: H A R T M A S T I X 12 % (H 12)Z a h l e n t a f e l 10

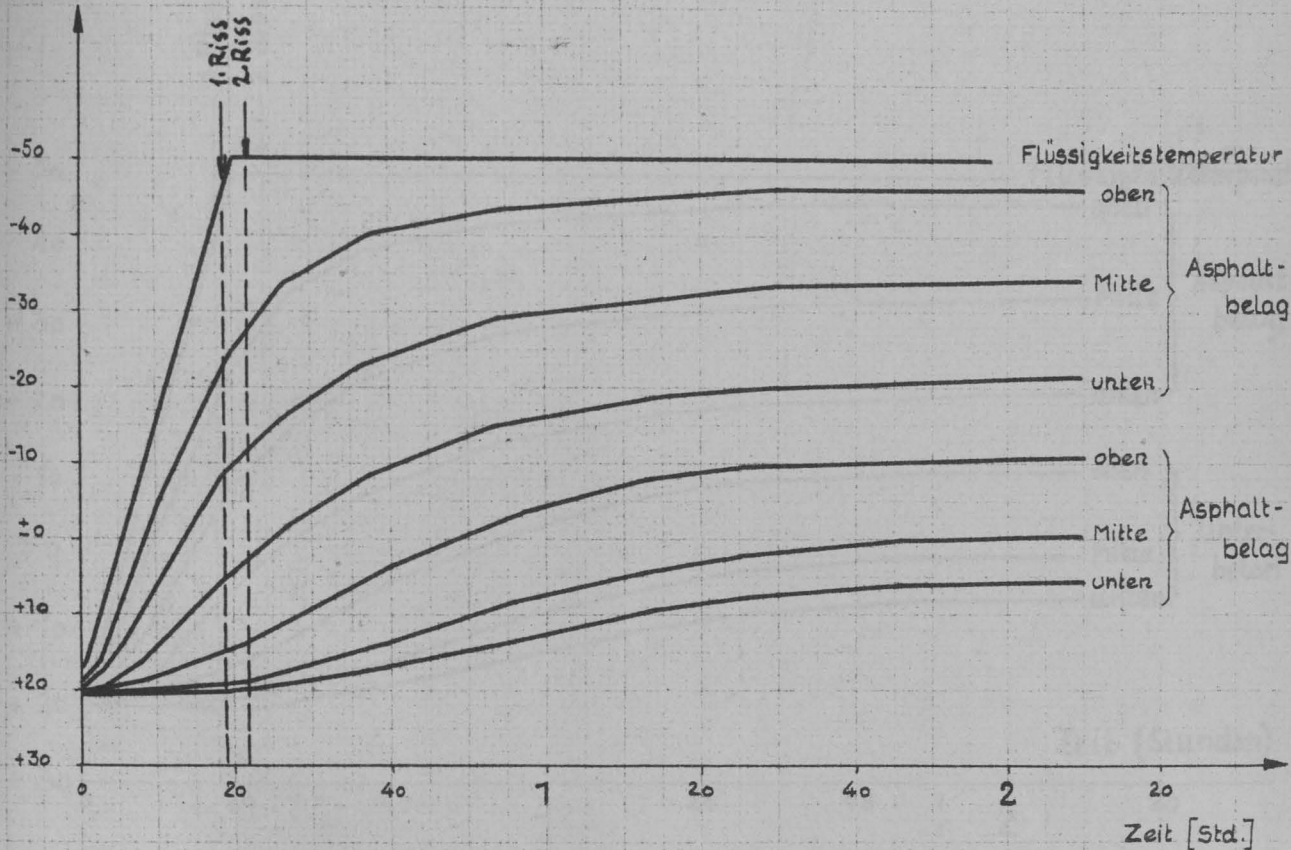
Lfd.Nr. des Belages	1	2	3	4	5	Mittel
O b e r f l ä c h e n r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten von Oberflächenrissen, in Min.	12	11	12	13	15	13
Temp.d.Kühlflüssigk. = Oberflächentemp. °C	-22	-19	-22	-26	-33	-26
Temp.an den Meßstellen im Asphalt	- 8 + 4 +13	- 6 + 4 +13	- 8 + 4 +13	-11 + 1 +11	-15 - 3 + 9	-11 + 1 +11
H a u p t r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	18	16	19	17	21	18
Temp.d.Kühlflüssigk. = Oberflächentemp. °C	-43	-36	-45	-38	-50	-43
Temperatur an den Meßstellen im Asphalt, °C	-21 - 6,5 + 6	-16 - 3 + 8	-23 - 9 + 5	-18 - 5 + 7	-26 -11 + 4,5	-21 - 6,5 + 6
Temperatur an der Belagsunterseite °C	+10	+11	+10	+11	+10	+10
Temp.Gefälle zwischen Ober- u. Unterseite des Asphaltbelages, in °C	53	47	55	49	60	53
Durchschnittstemp. °C = Temp.Meßst.Mitte	-6,5	-3	-9	-5	-11	-6,5
Anzahl der unvollständigen Hauptrisse:	-	-	2	1	1	
vollständig	2	2	1	2	1	

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

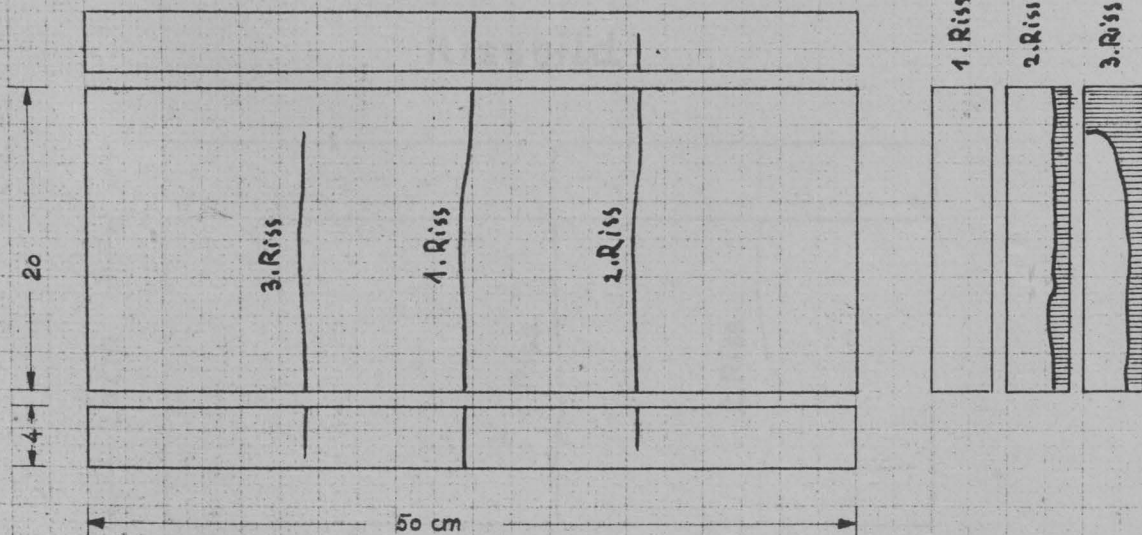
HARTMASTIX 12 %

Belag 3

Temperatur [Grad C.]

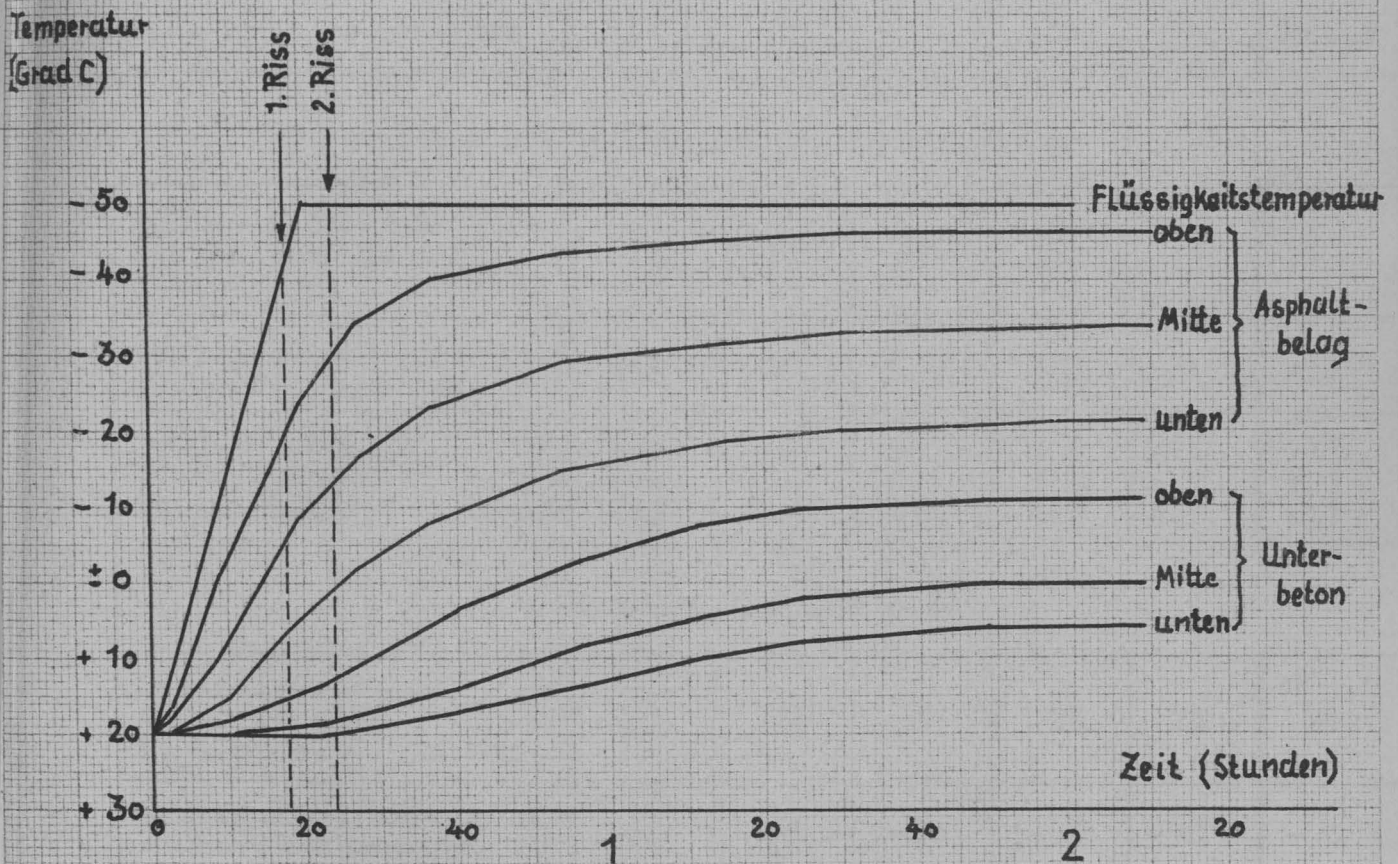


Rissbild

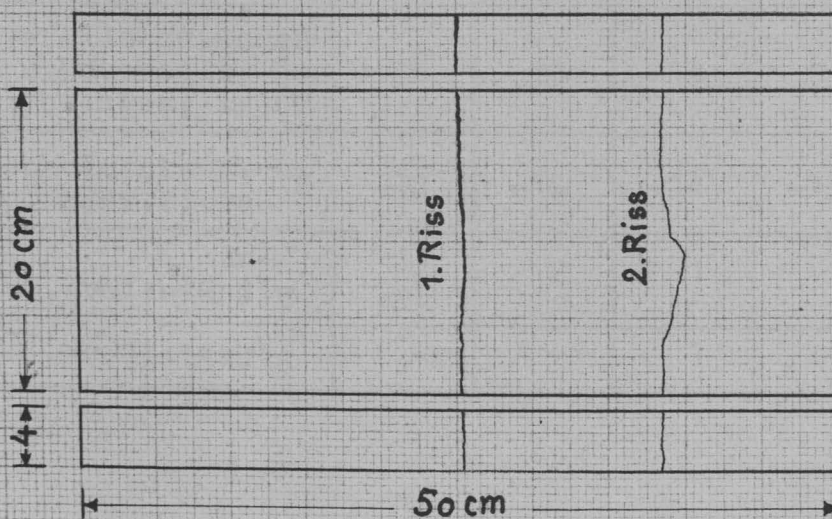


Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

HARTMASTIX 12% Belag 1



Rissbild



Rißbildung an Prüfbelägen

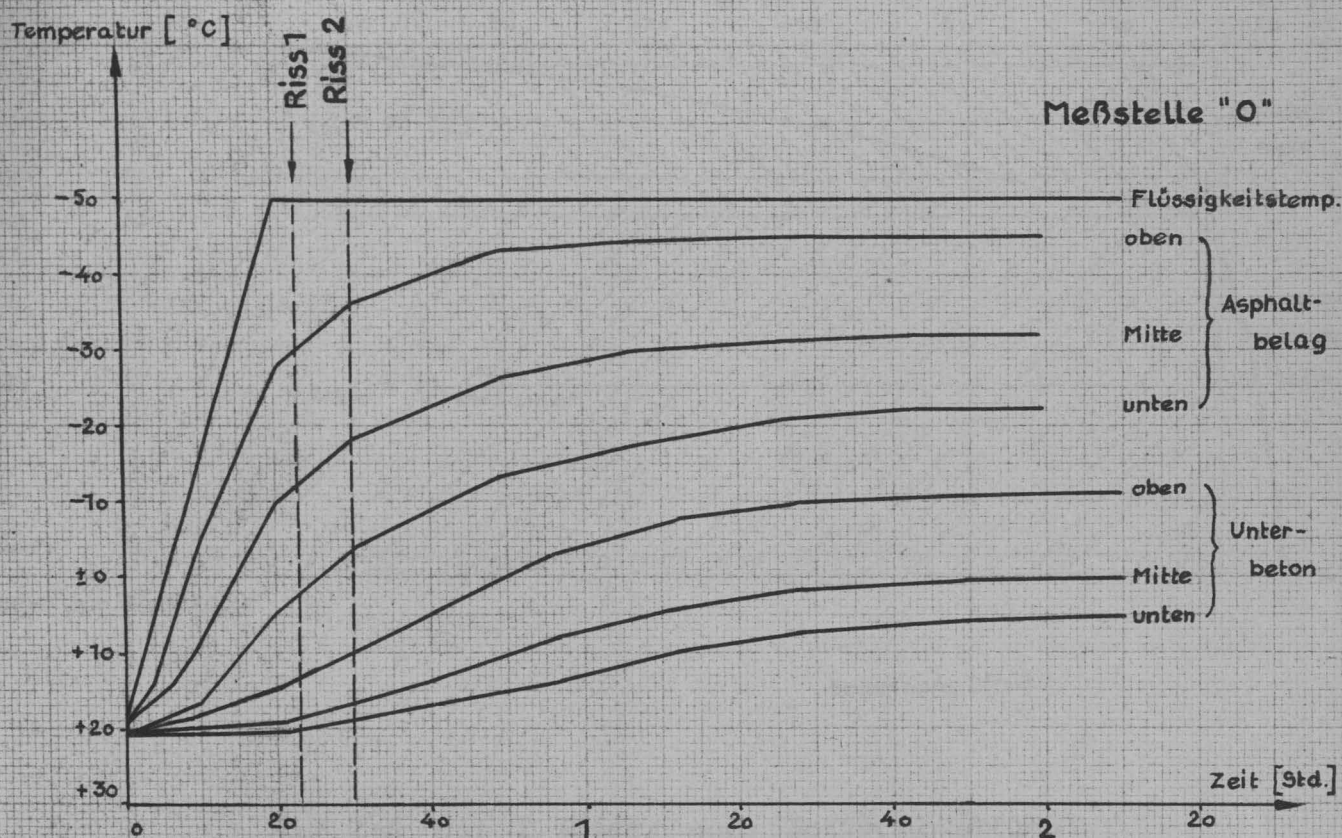
schnelle Abkühlung (70 °C in 20 Minuten)

Material: H A R T M A S T I X 16 % (H 16)Z a h l e n t a f e l 11

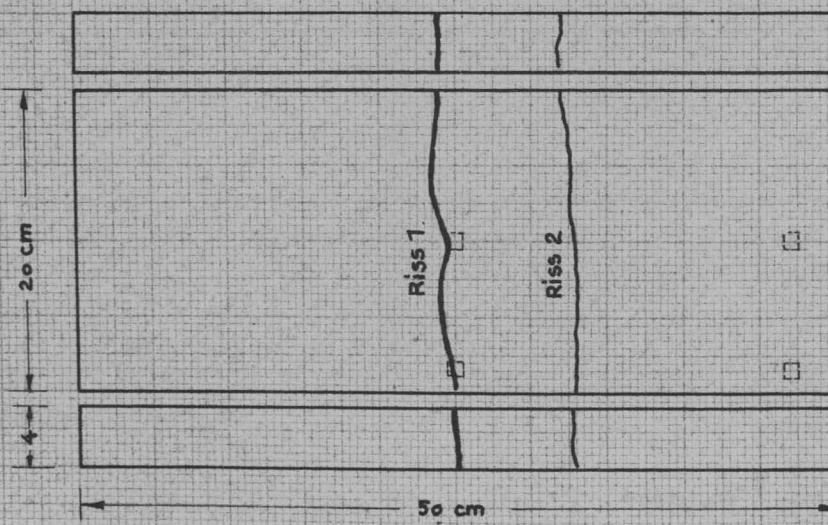
Lfd. Nr. des Belages	1	2	3	4	5	Mitte
O b e r f l ä c h e n r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten von Oberflächenrissen, in Min.	12	15	14	12	13	13
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-22	-33	-29	-22	-26	-26
Temp.an den Meßstellen im Asphalt	oben Mitte unten	- 8 + 4 +13	-15 - 3 + 9	-13 - 1 +10	- 8 + 4 +13	-11 + 1 +11
H a u p t r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	23	27	25	24	23	24
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-50	-50	-50	-50	-50	-50
Temperatur an den Meßstellen im Asphalt, °C	oben Mitte unten	-31 -12 + 2	-34 -16 - 1	-32 -14 ± 0	-31,5 -13 + 1	-31 -12 + 2
Temperatur an der Belagsunterseite °C	+ 6	+ 3	+ 4	+ 5	+ 6	+ 5
Temp.Gefälle zwischen Ober- u.Unterseite des Asphaltbelages, in °C	56	53	54	55	56	55
Durchschnittstemp. °C = Temp.Meßst.Mitte	-12	-16	-14	-13	-12	-13
Anzahl der Haupt- risse	un- vollständig	2	2	1	1	2
	vollständig	-	-	1	-	1

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

HARTMASTIX 16% Belag 1



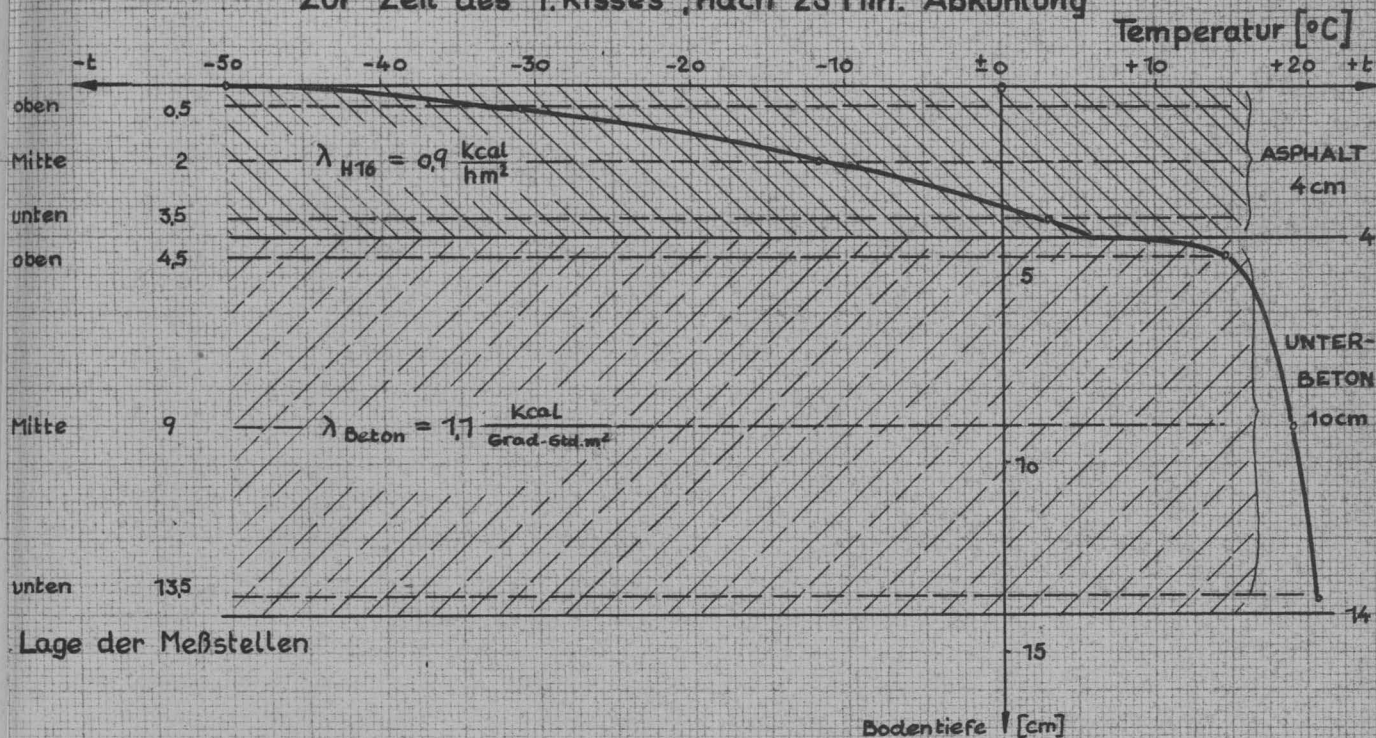
Rissbild



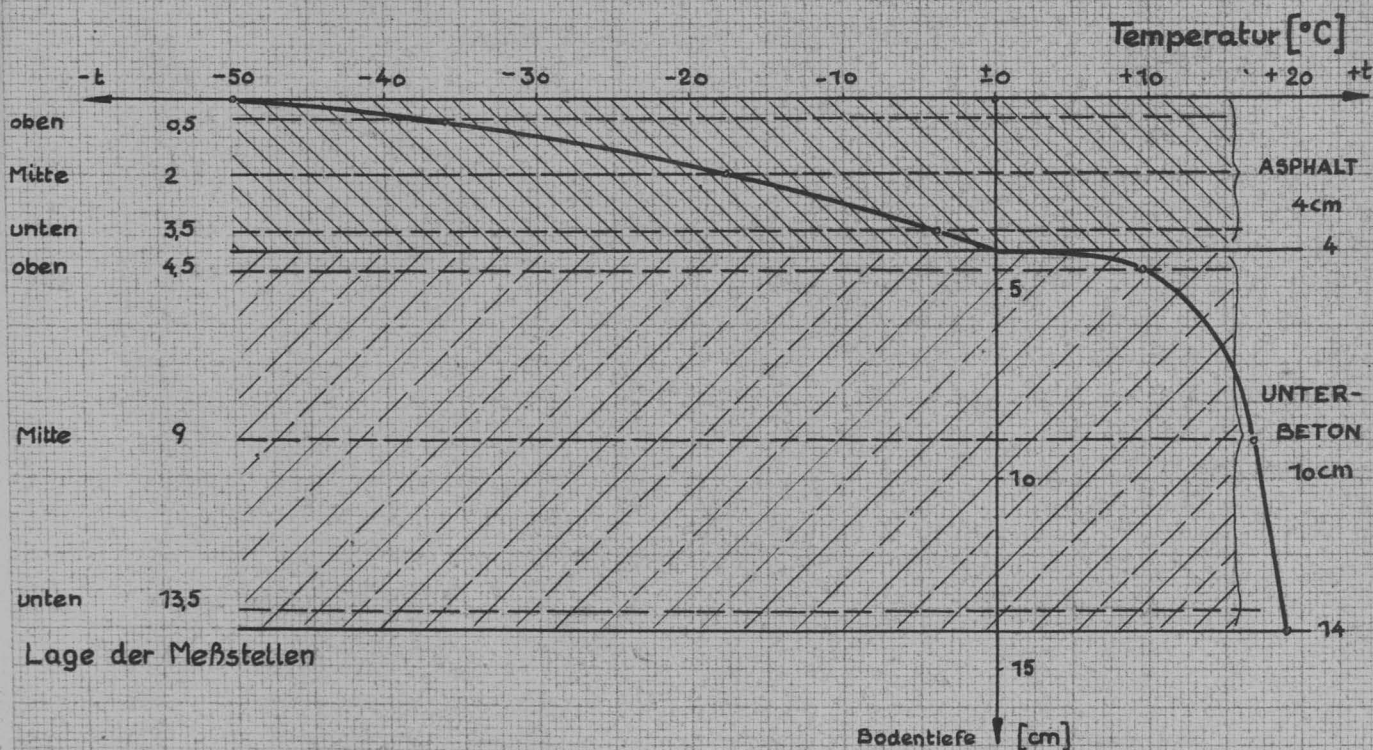
HARTMASTIX 16 % Belag 1

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Beton bei -50° Oberflächentemperatur und schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

Zur Zeit des 1. Risses nach 23 Min. Abkühlung



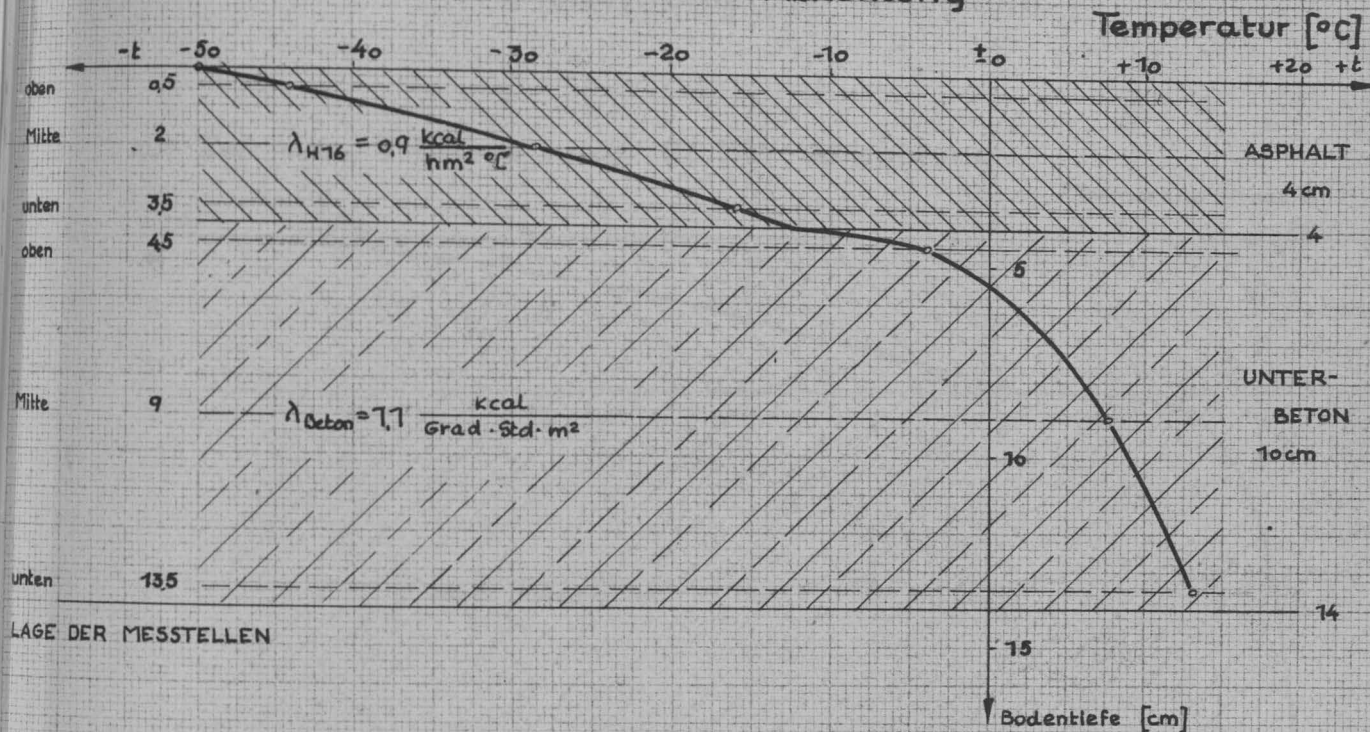
Zur Zeit des 2. Risses nach 30 Min. Abkühlung



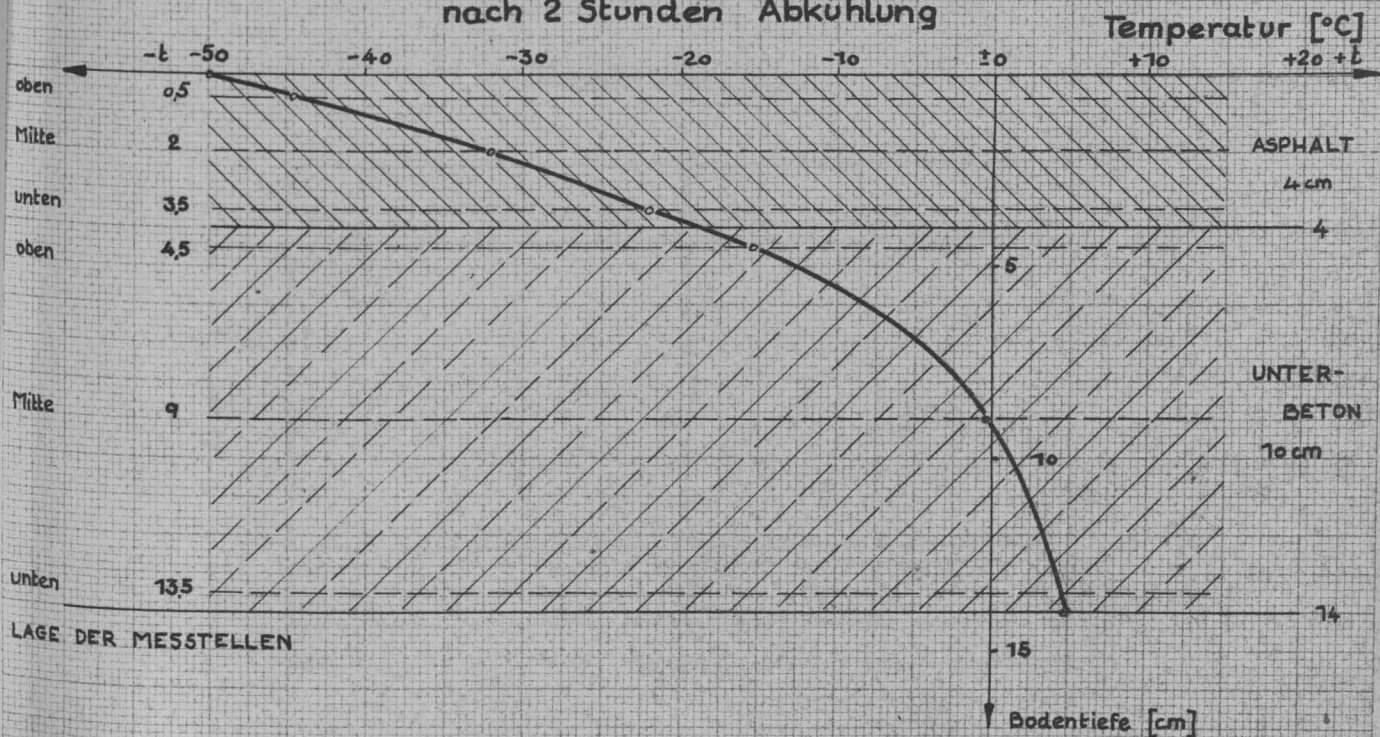
HARTMASTIX 16% Belag 1

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Beton bei -50° Oberflächentemperatur und schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

nach 1 Stunde Abkühlung



im Zeitpunkt, in dem die Temperaturen nicht mehr absinken
nach 2 Stunden Abkühlung

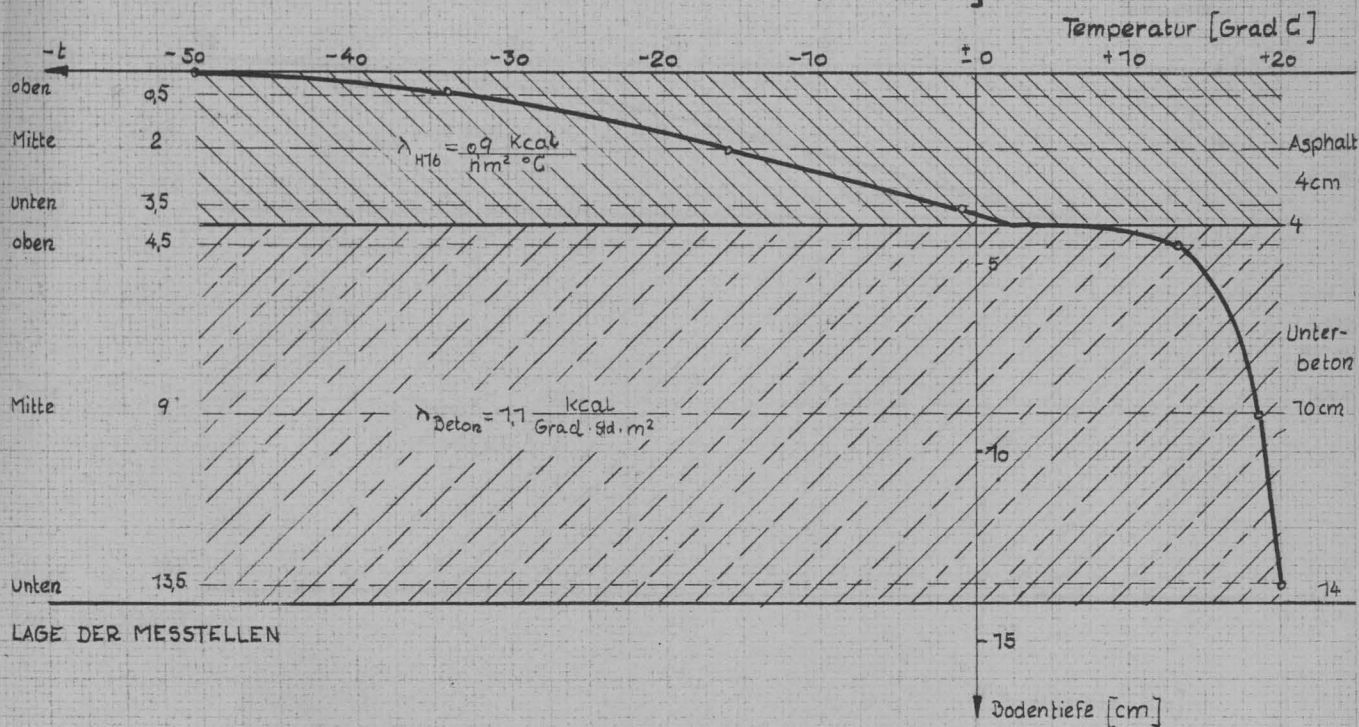


HARTMASTIX 16 %

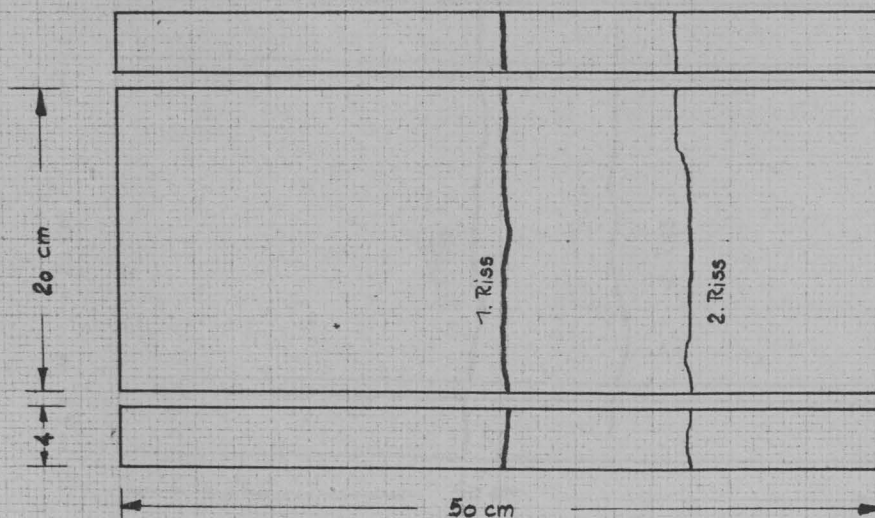
Belag 2

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Beton
bei -50° Oberflächentemperatur und schneller
Abkühlung (70° in 20 Min.)

zur Zeit des 1. Risses nach 27 Min. Abkühlung



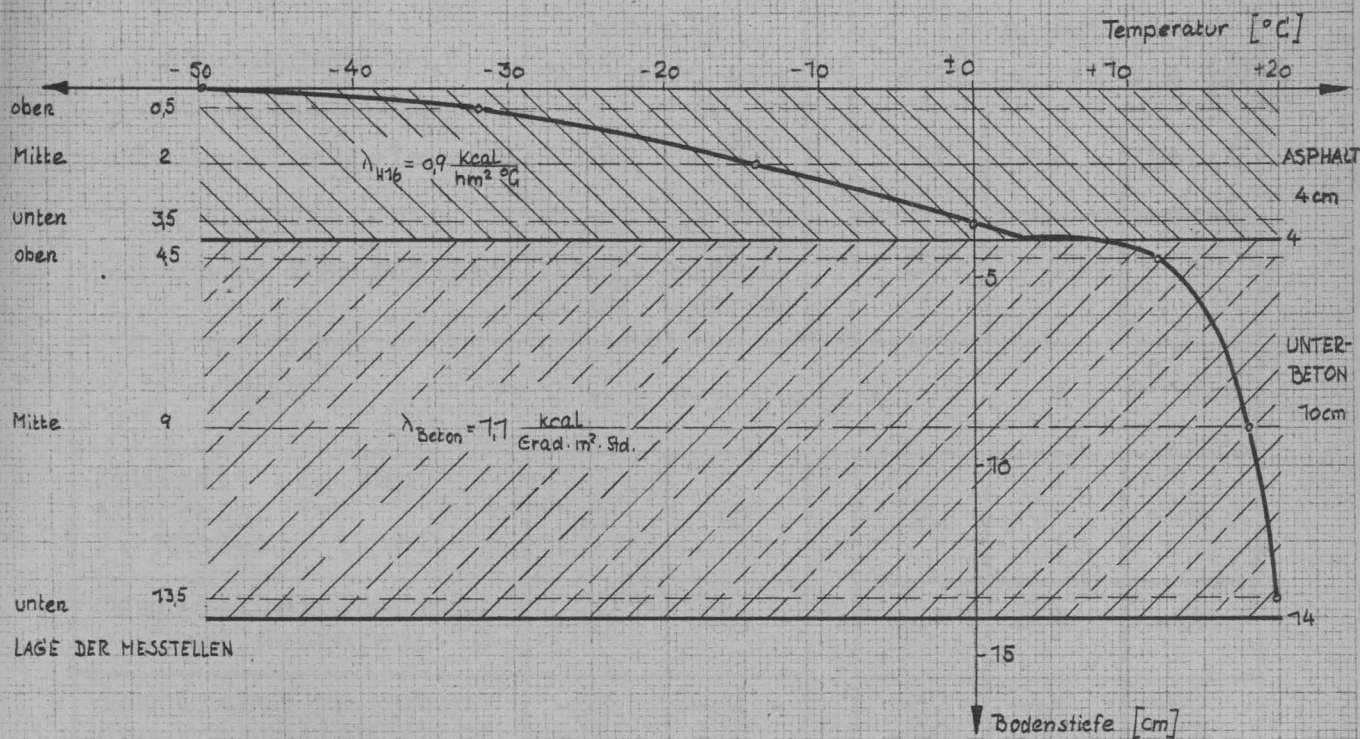
Rissbild



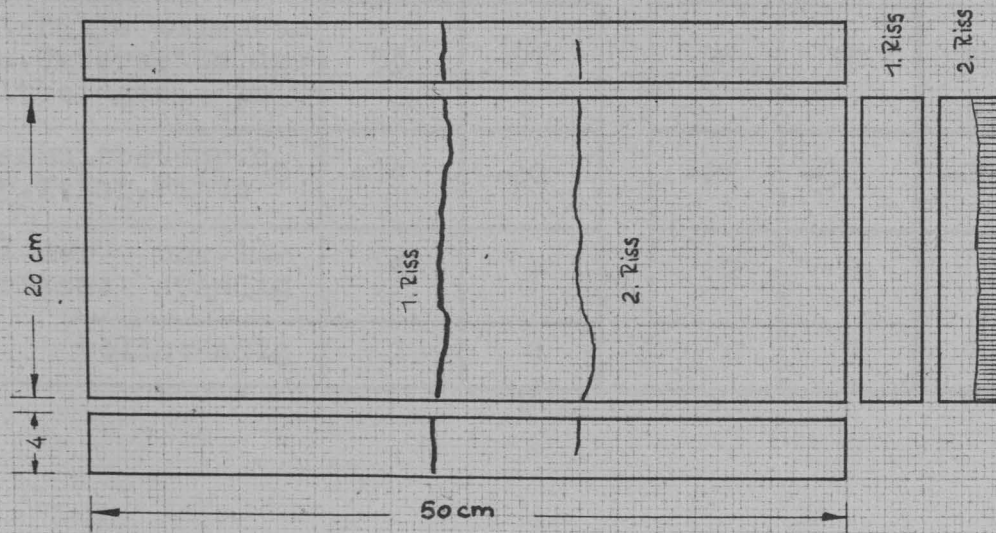
HARTMASTIX 16 % Belag 3

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Beton bei -50° Oberflächentemperatur und schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

zur Zeit des 1. Risses, nach 25 Min Abkühlung



Rissbild



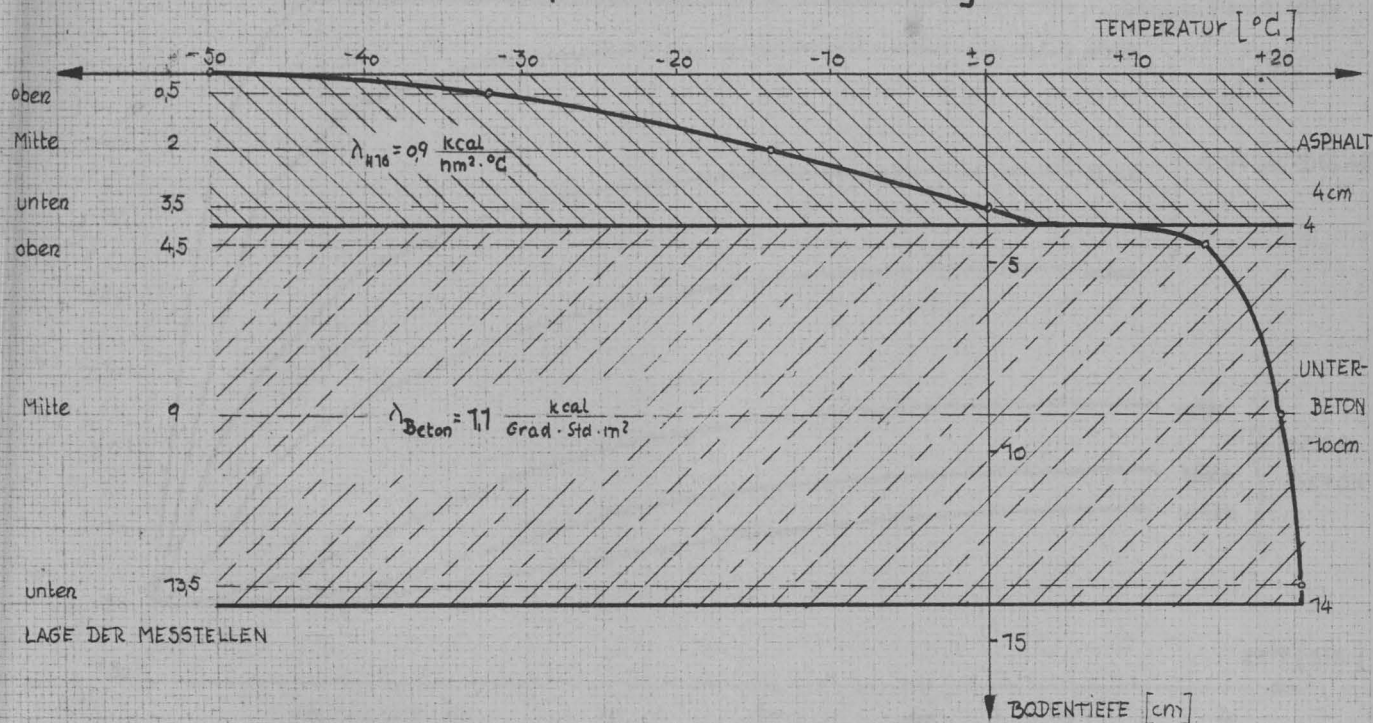
Rissbildung an PrüfbelägenMaterial: H A R T M A S T I X 16 % (H 16)Z a h l e n t a f e l 12

Kühlgeschwindigkeit	schnell 70° in 20 Min.		langsam 70° in 210 Min.		
Lfd. Nr. des Belages	6	7	11	12	Mittel
besondere Kennzeichen	mit Glasf.- vlies	Rahmen einge- sunken	-	-	-
H a u p t r i s s e					
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	25	23	189	207	200
Temp.d.Kühlflüssigk. = Oberflächentemp. °C	-50	-60	-43	-49	-46
Temperatur an oben den Meßstellen Mitte im Asphalt, °C unten	-32 -14 ± 0	-42 -20 - 4	-37 -26 -12	-43 -32 -17	-40 -29 -14,5
Temperatur an der Belagsunterseite °C	+ 3	+ 1	- 7,5	-14	-11
Temp.Gefälle zwischen Ober-u.Unterseite des Asphaltbelages, in °C	53	61	35,5	35	35
Durchschnittstemp. °C = Temp.Meßst.Mitte °C	-14	-20	-26	-32	-29
Anzahl der unvoll- Hauptrisse: ständig	1	-	2	2	
vollständig	1	1	2	1	

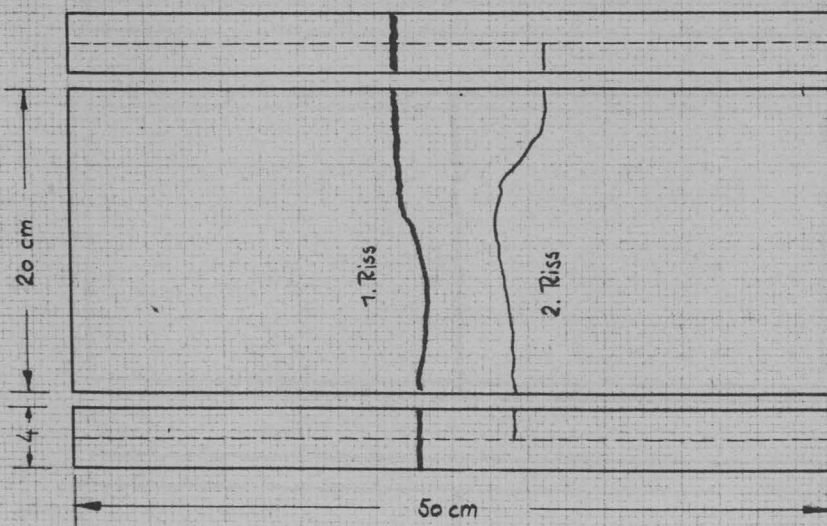
HARTMASTIX 16 % mit Glasfaserflieszwischenlage in halber Höhe des Asphaltbelages Belag 6

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Beton
bei -50° Oberflächentemperatur und schneller
Abkühlung (70° in 20 Min.)

zur Zeit des 1. Risses, nach 25 Min Abkühlung

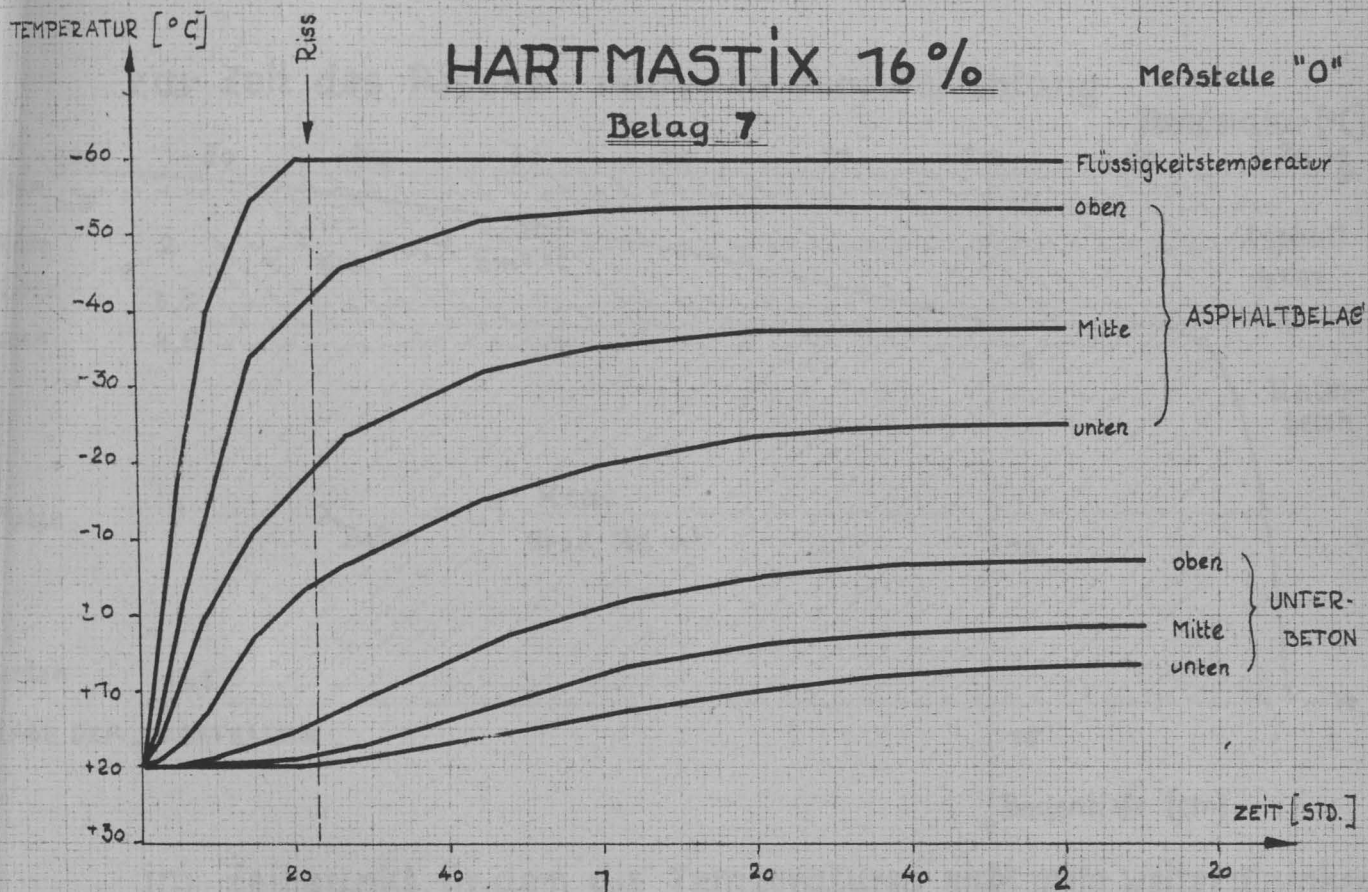


Rissbild

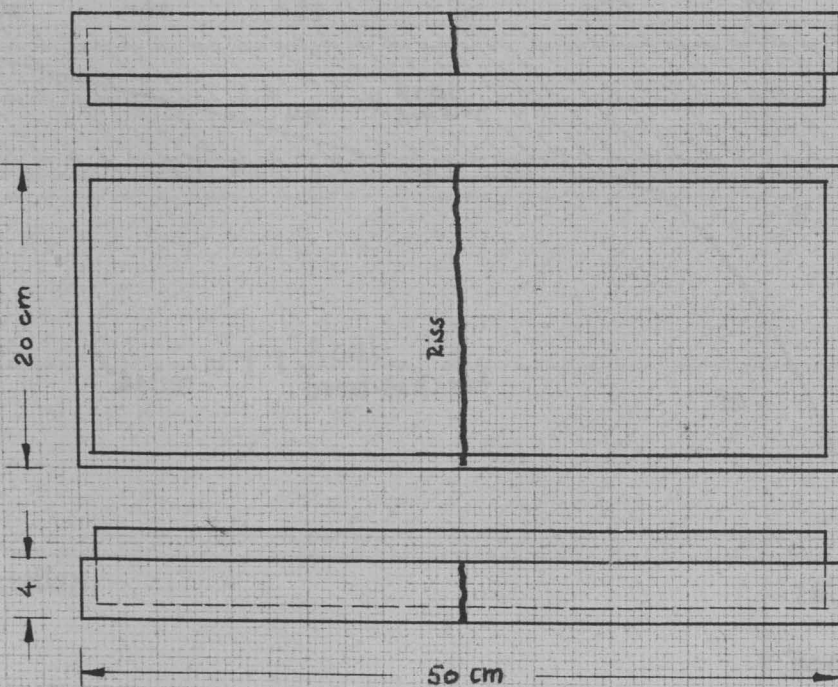


Temperaturverlauf im Asphaltbelag und Unterbeton bei schneller Abkühlung (80° in 21 Min.)

Asphaltbelag durch Papierzwischenlage vom Unterbeton getrennt
Rahmen für Kühlflüssigkeit 3cm im 4cm dicken Asphaltbelag
eingebettet ; dadurch Einspannung des Belages.

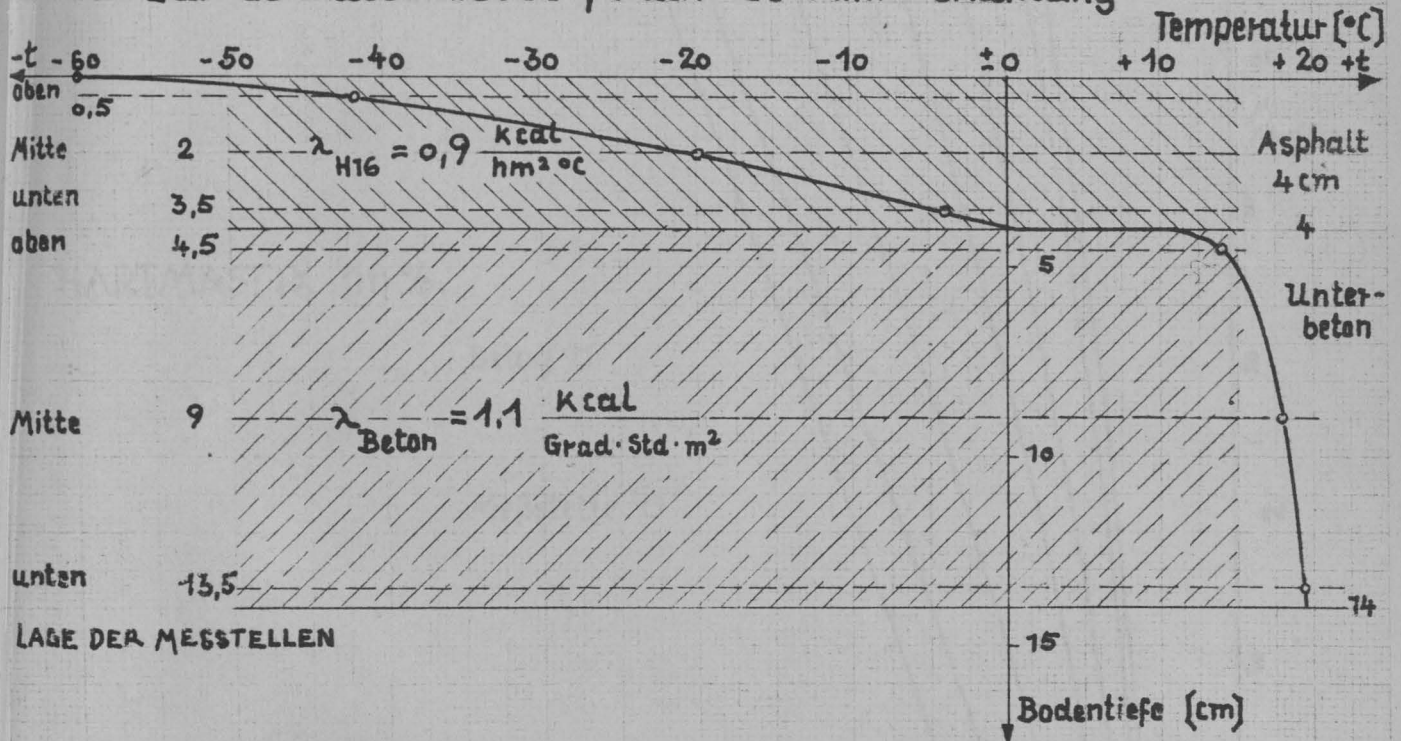


Rissbild

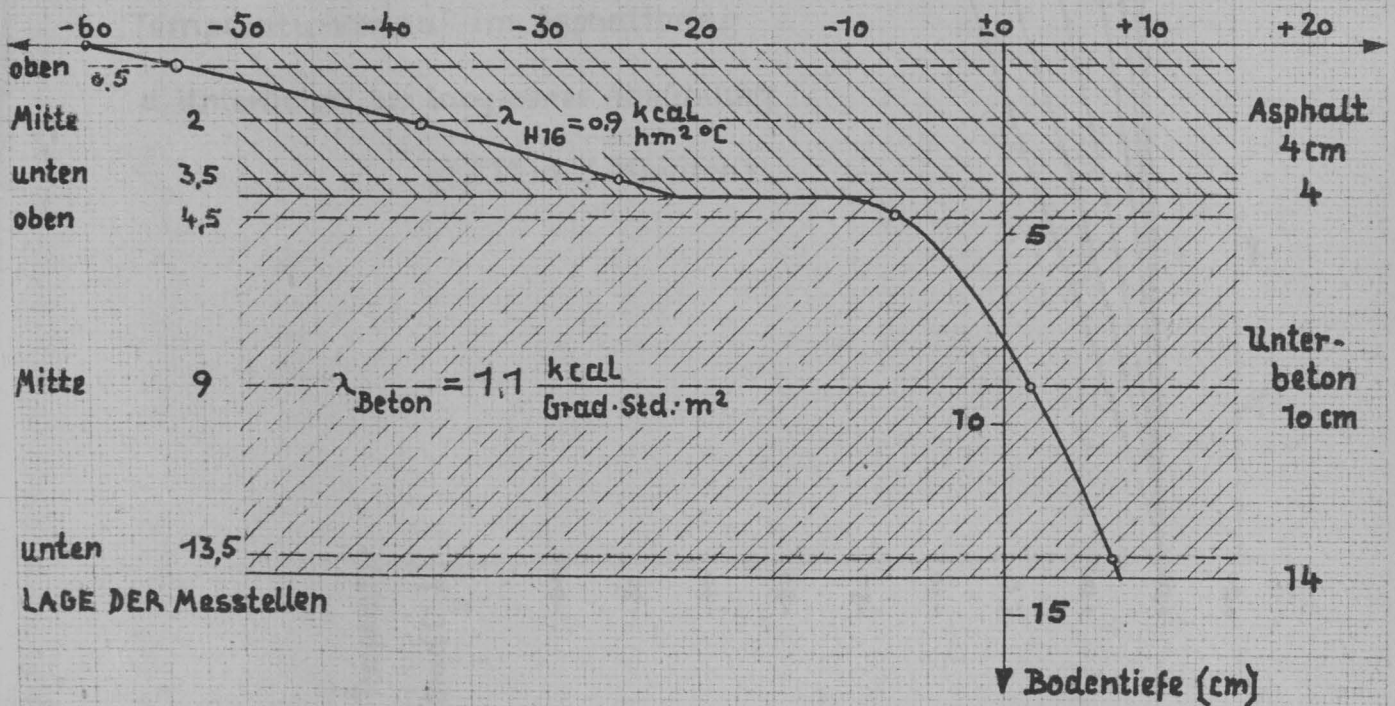


- Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Beton bei -60° Oberflächentemperatur und schneller Abkühlung (80° in 21 Min.)
- Papierzwischenlage, Rahmen 3 cm tief eingebettet

zur Zeit des Risses, nach 23 Min. Abkühlung



im Zeitpunkt, in dem die Temperaturen nicht mehr weiter absinken nach 2 Stunden Abkühlung

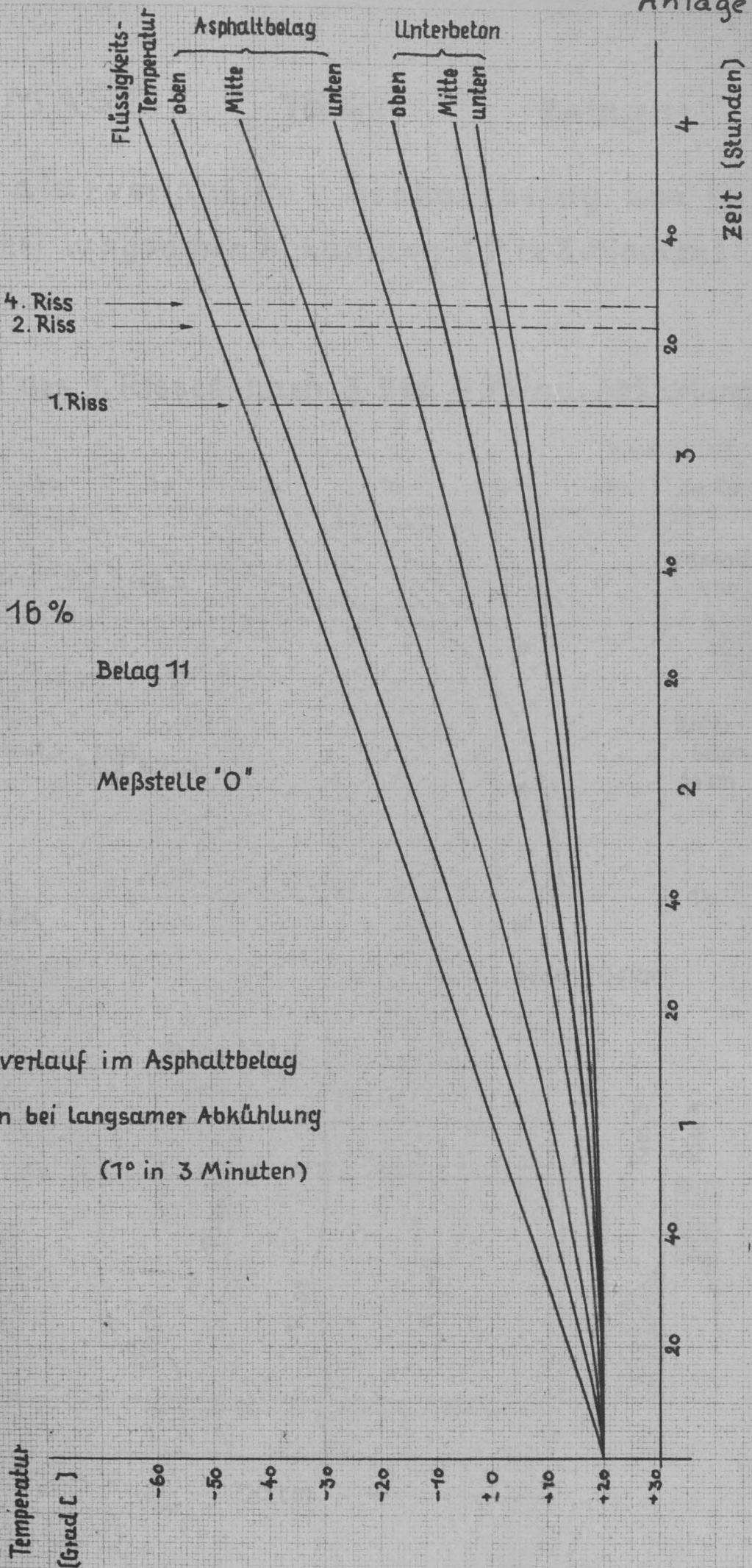


HARTMASTIX 16 %

Belag 11

Meßstelle "O"

Temperaturverlauf im Asphaltbelag
u. Unterbeton bei langsamer Abkühlung
(1° in 3 Minuten)

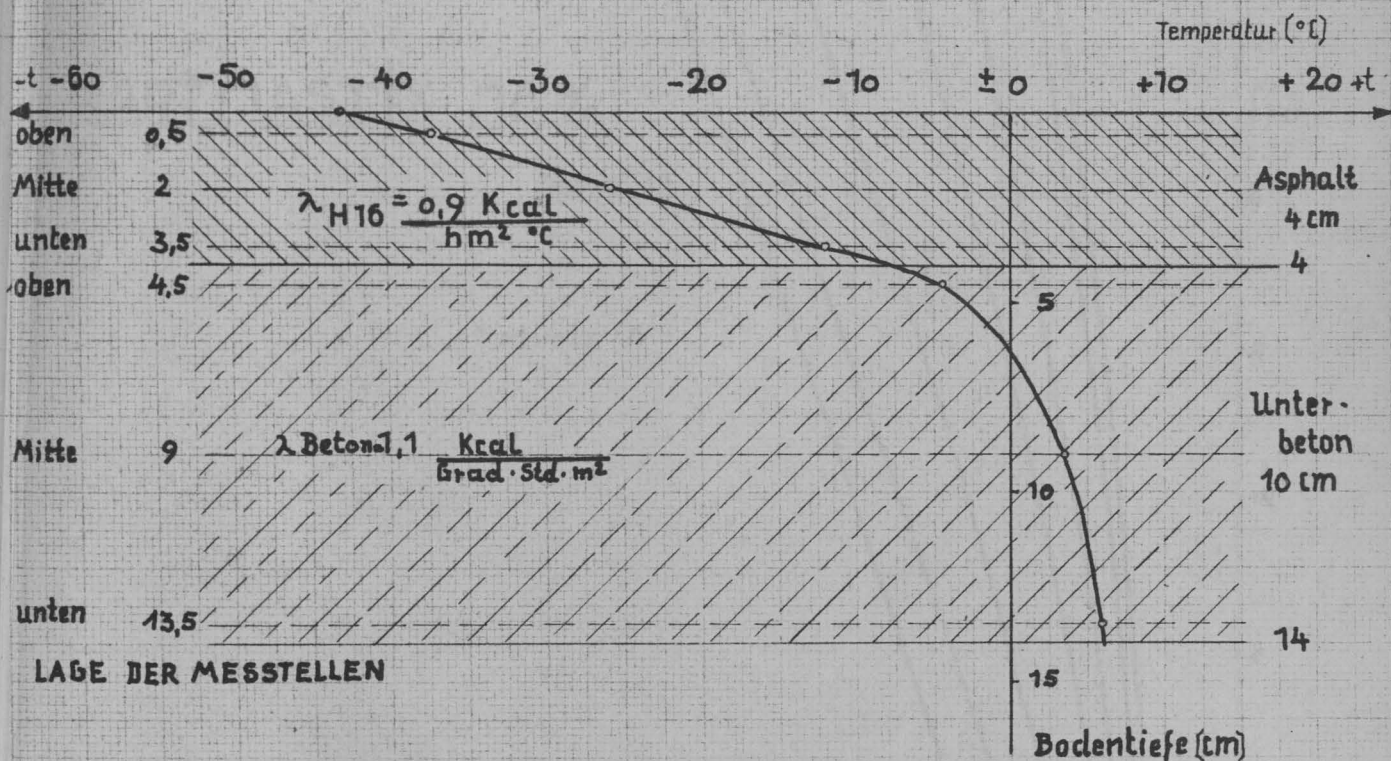


HARTMASTIX 16%

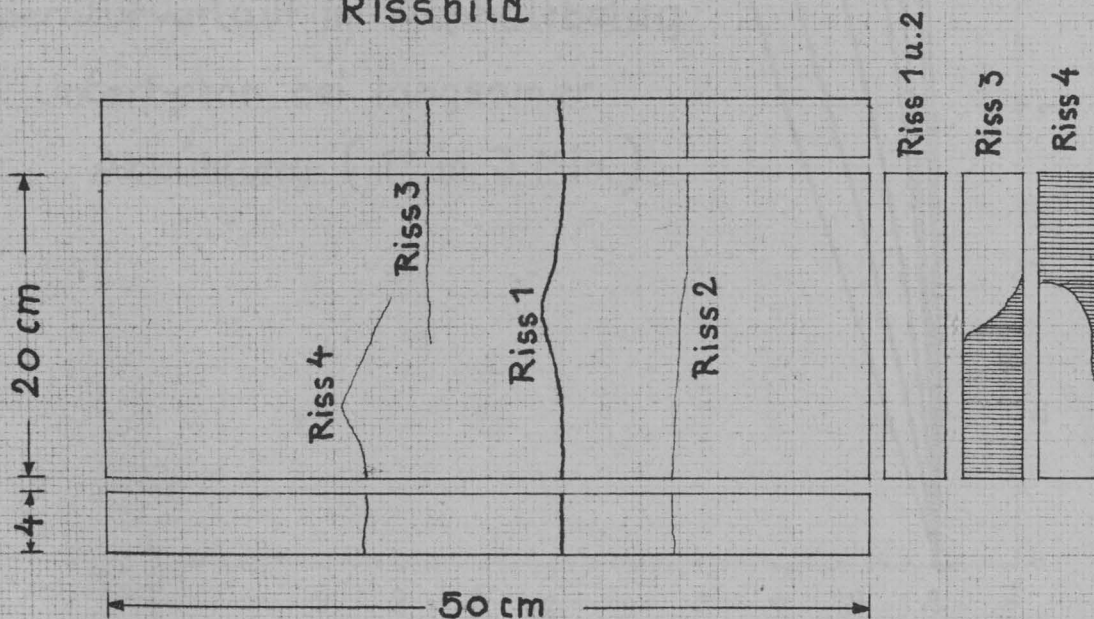
Belag 11

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Beton bei langsamer Abkühlung (1° in 3 Minuten)

zur Zeit des 1. Risses nach 3 Std. 9 Minu. Abkühlung



Rissbild

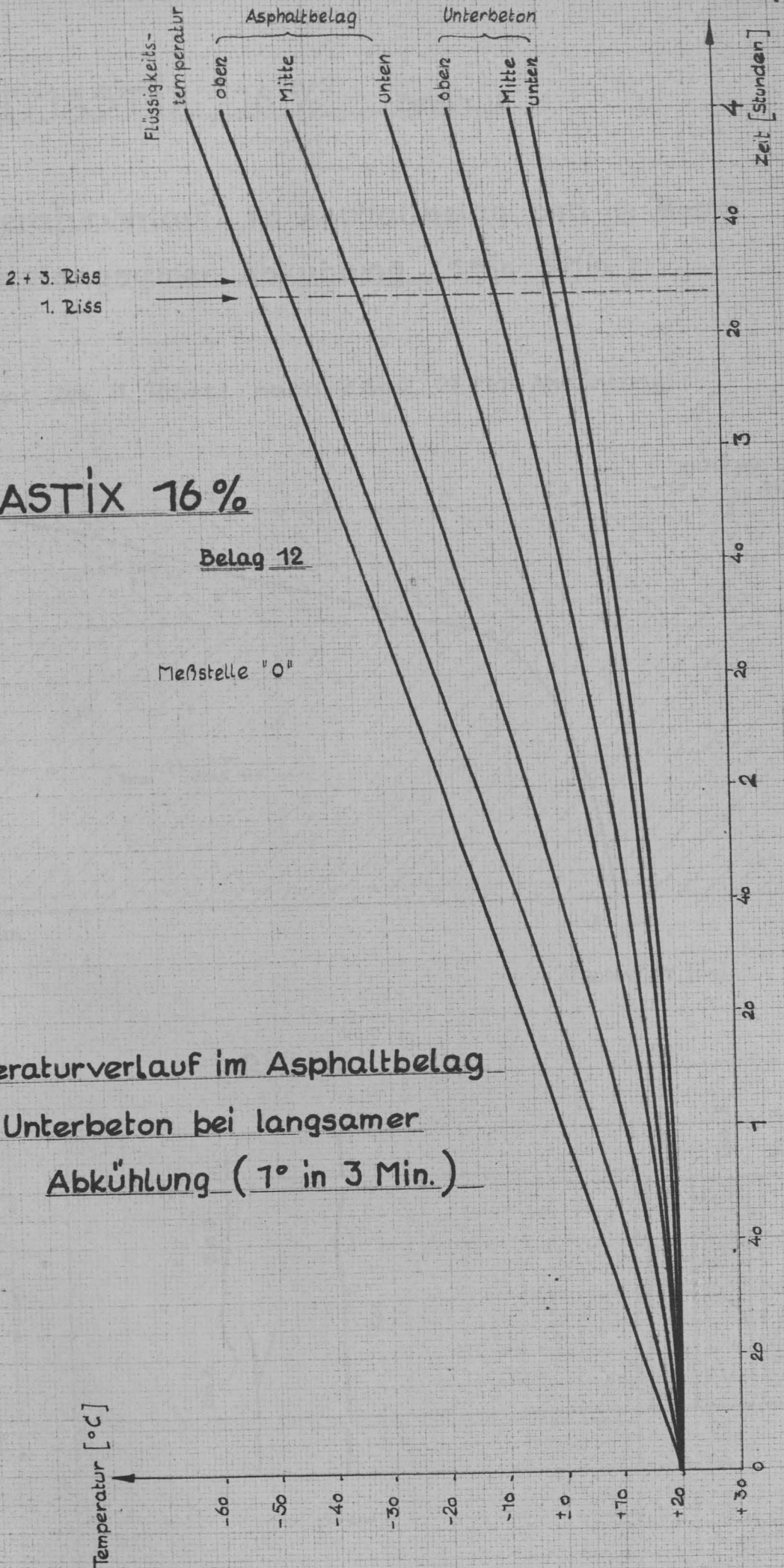


HARTMASTIX 16 %

Belag 12

Meßstelle "0"

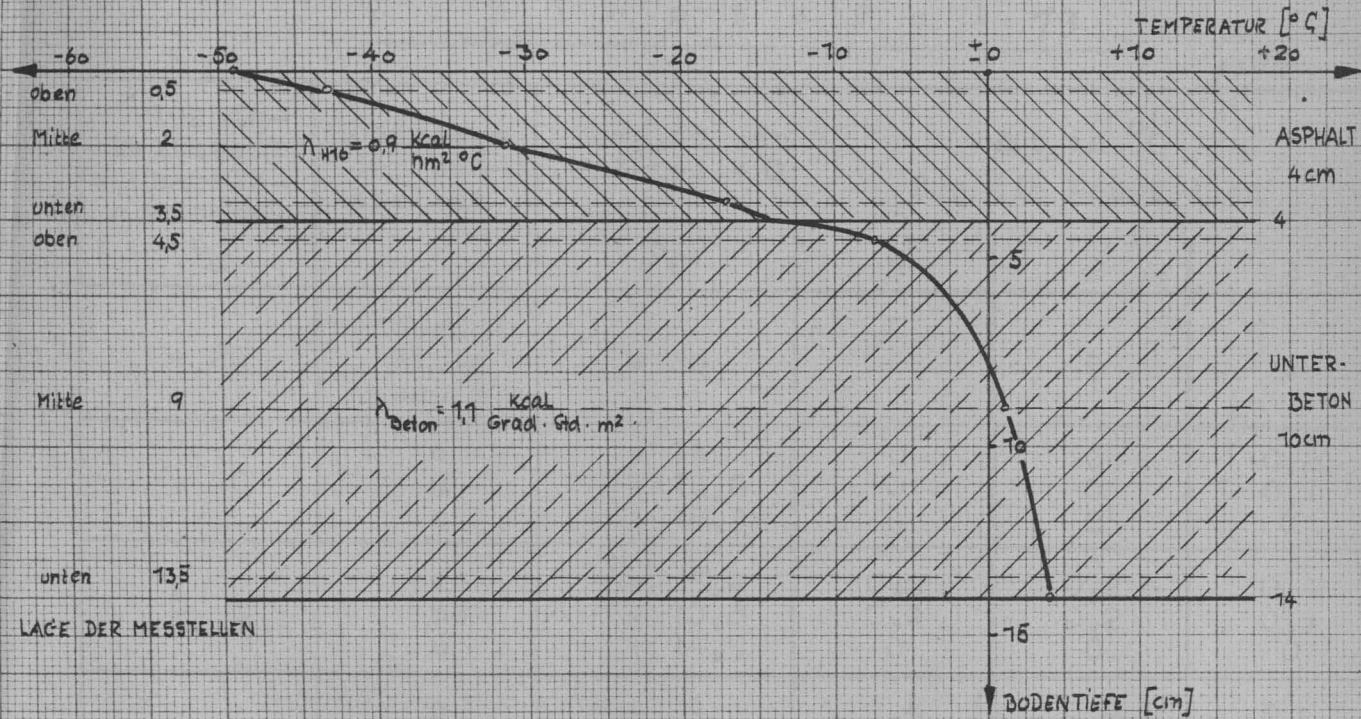
Temperaturverlauf im Asphaltbelag
und Unterbeton bei langsamer
Abkühlung (1° in 3 Min.)



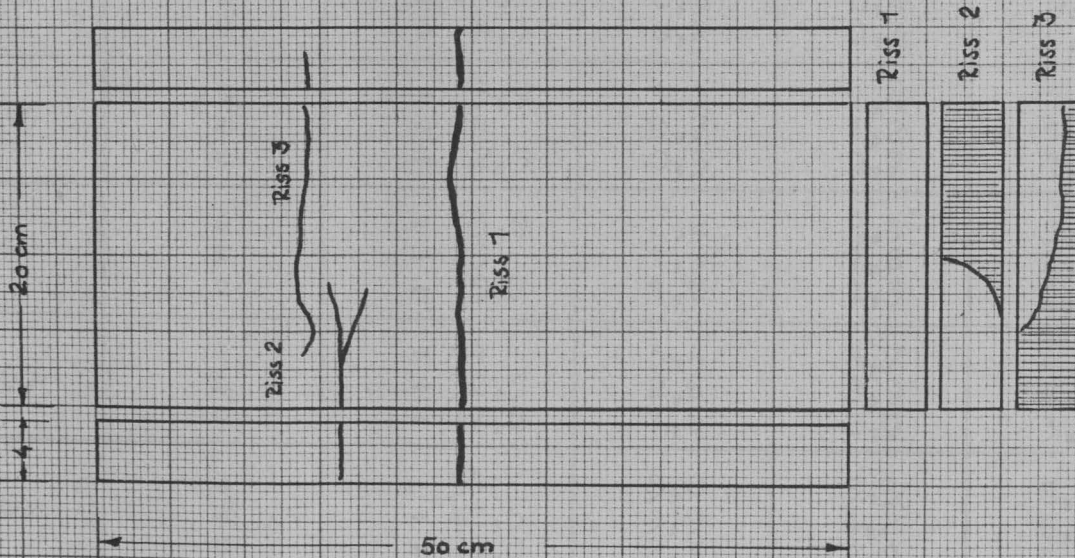
HARTMASTIX 16 % Belag 12

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Beton bei langsamer Abkühlung (1° in 3 Min.)

zur Zeit des 1. Risses nach 3 Std. 27 Min. Abkühlung



Rissbild



Prüfbeläge: Temperaturverlauf im QuerschnittTemperaturdifferenz Δt der Meßstellen
1, 2 und 3 gegenüber der Meßstelle 0

Hartmastix 16 %, langsame Abkühlung

Die Temperaturen an den Meßstellen 1, 2 und 3 liegen um Δt °C
höher als an der Meßstelle 0.Z a h l e n t a f e l 13

Flüssig- keitstemp. = Oberflä- chentemp. °C	Höhenlage der Meß- stellen	Temp. an der Meßstelle 0 °C	Δt in °C für die Meßstellen		
			1	2	3
+ 20	oben Mitte unten	+ 20	0	0	0
+ 10	o m u	+ 14	0	0	0,2
		+ 16,8	0	0	0,1
		+ 18,3	0	0	0
± 0	o m u	+ 5,4	0,2	0,2	0,4
		+ 10,8	0,1	0,2	0,1
		+ 14,9	0	0	0
- 10	o m u	- 4	0,4	0,4	0,6
		+ 3,2	0,2	0,2	0,5
		+ 10	0,1	0,1	0,2
- 20	o m u	- 13,9	0,7	0,8	1,4
		- 5,1	0,3	0,4	0,9
		+ 4,3	0,2	0,3	0,4
- 30	o m u	- 23,9	1,3	1,4	1,9
		- 14	0,7	1,2	1,5
		- 2,5	0,5	0,7	1,1
- 40	o m u	- 33,9	2,2	2,4	3,1
		- 23	1,5	1,8	2,8
		- 9,7	1,0	1,3	2,3
- 50	o m u	- 44	3,4	3,7	4,8
		- 32,5	2,6	2,9	4,2
		- 17,8	1,6	2,0	3,7
- 60	o m u	- 54	5,0	5,3	8,0
		- 42,5	3,9	4,2	6,2
		- 26,0	2,3	2,9	5,4

Rißbildung an Prüfbelägen

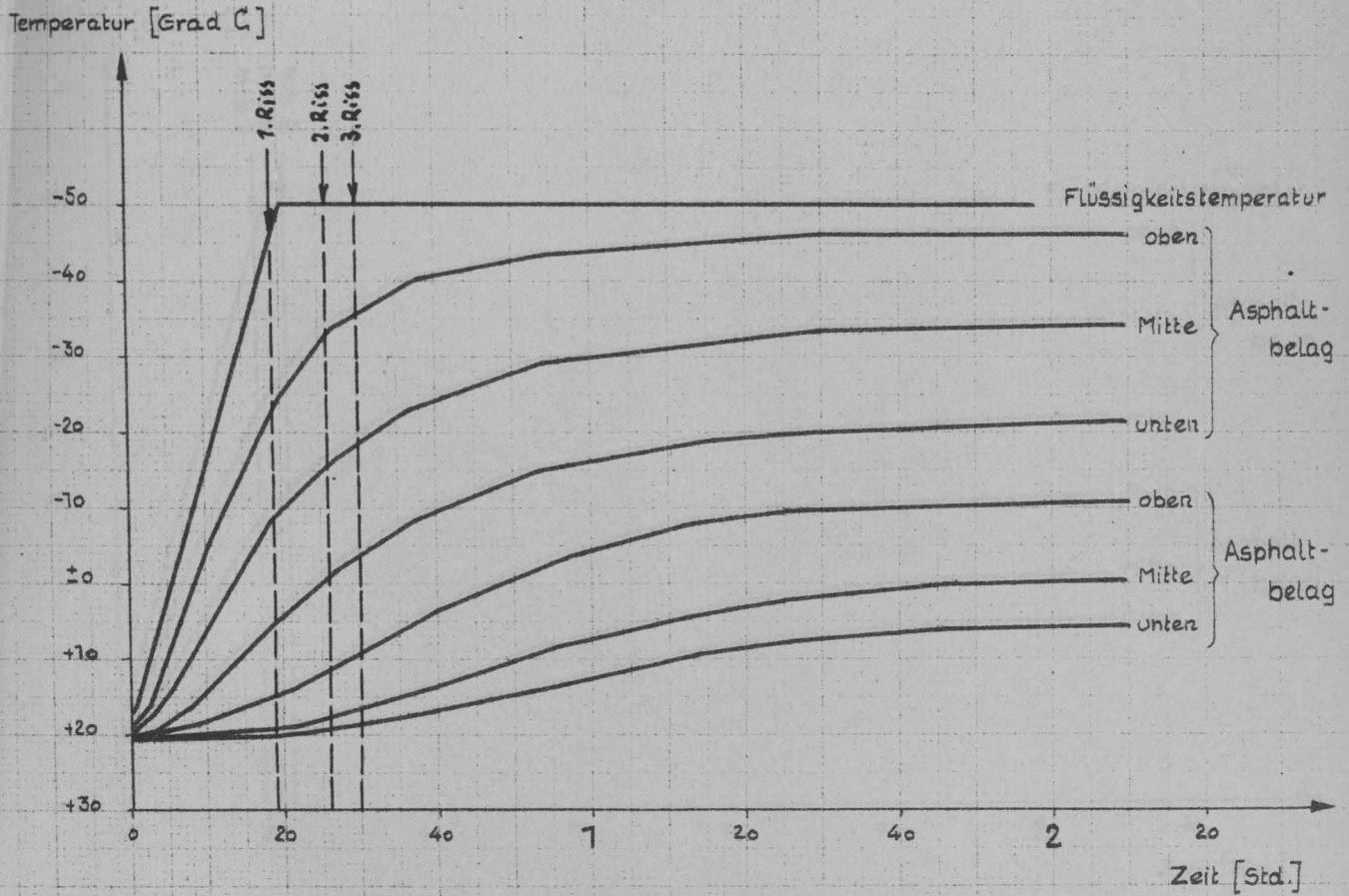
schnelle Abkühlung (70 °C in 20 Minuten)

Material: I S O L I E R M A S T I X 16 % (J 16)Z a h l e n t a f e l 14

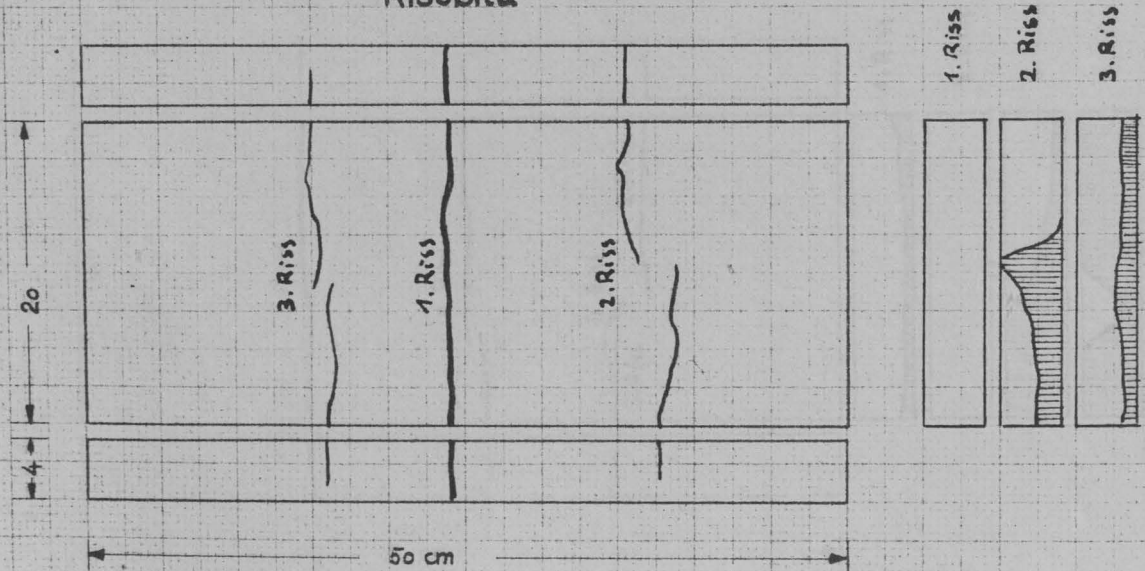
Lfd. Nr. des Belages	1	2	3	4	5	Mitte
O b e r f l ä c h e n r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten von Oberflächenrissen, in Min.	9	12	8	12	14	11
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-12	-22	-9	-22	-29	-19
Temp.an den Meßstellen im Asphalt °C						
oben	- 2	-11	+1	-11	-13	- 6
Mitte	+ 8	+ 1	+10	+ 1	- 1	+ 4
unten	+15	+11	+16	+11	+10	+13
H a u p t r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	19	22	19	22	23	21
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-40	-50	-46	-50	-50	-50
Temperatur an den Meßstellen im Asphalt, °C						
oben	-23	-27	-23	-27	-31	-26
Mitte	- 8,5	-12	- 8,5	-12	-12	-11
unten	+ 5	+ 2,5	+ 5	+ 2,5	+ 2	+ 4,5
Temperatur an der Belagsunterseite °C	+ 8	+ 7	+ 8	+ 7	+ 6	+10
Temp.Gefälle zwischen Ober- u.Unterseite des Asphaltbelages, in °C	54	57	54	57	56	60
Durchschnittstemp. °C = Temp.Meßst.Mitte	- 8,5	-12	- 8,5	-12	-12	-11
Anzahl der Haupt- risse						
unvollständig	2	2	2	1	2	
vollständig	1	-	1	1	1	

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

JSOLIERMASTIX 16% Belag 1



Rissbild

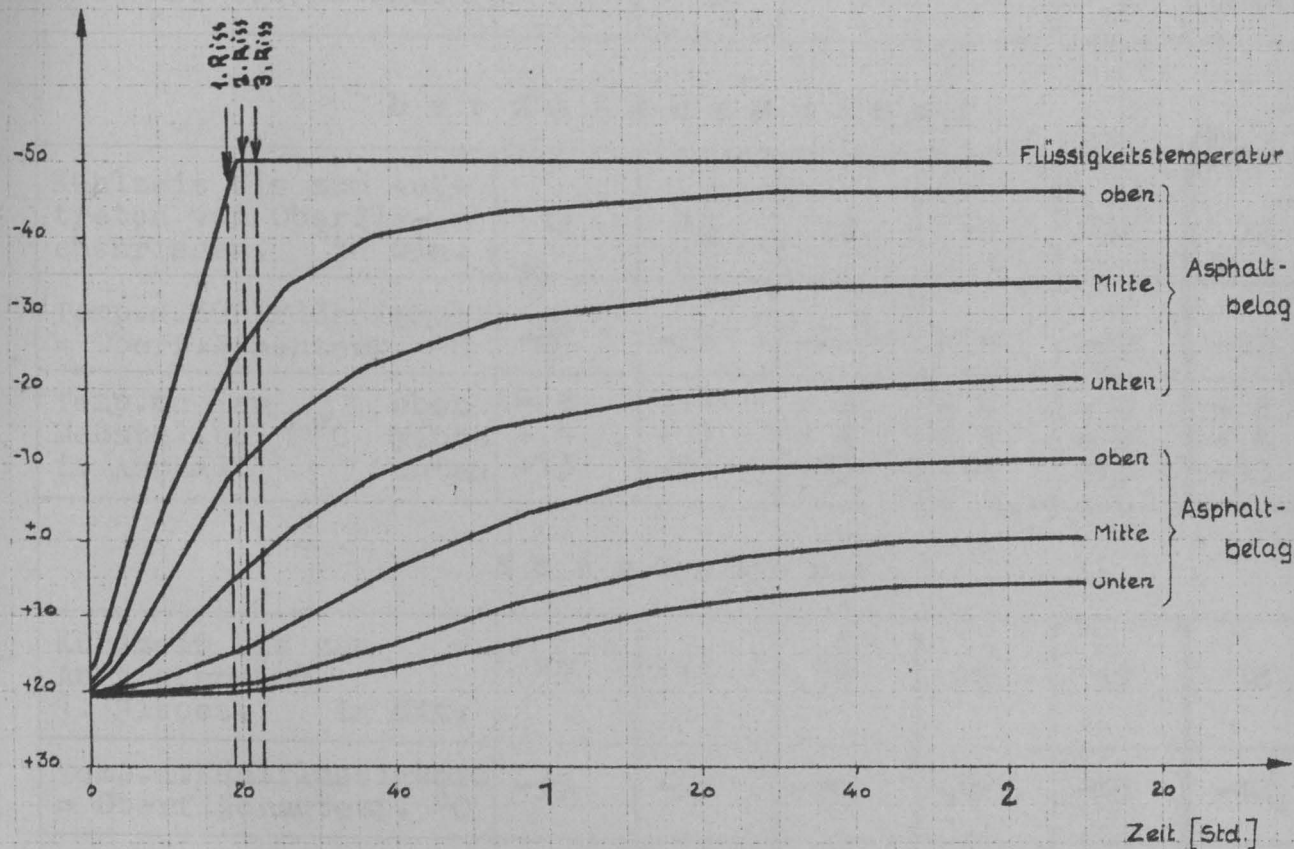


Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

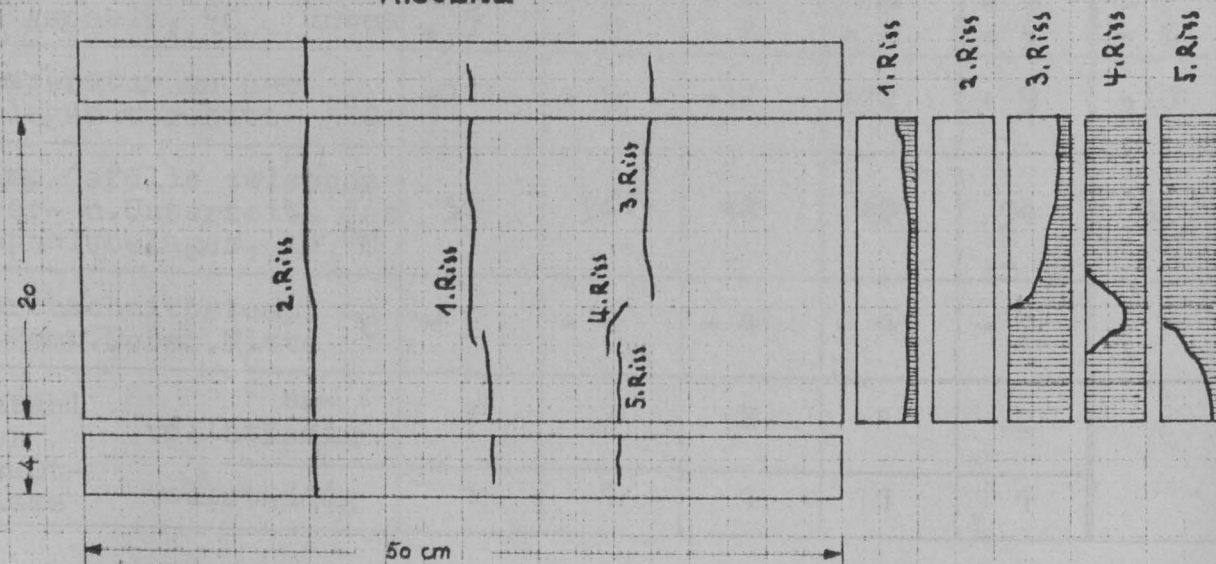
JSOLIERMASTIX 16%

Belag 3

Temperatur [Grad C]



Rissbild



Rißbildung an Prüfbelägen

schnelle Abkühlung (70 °C in 20 Minuten)

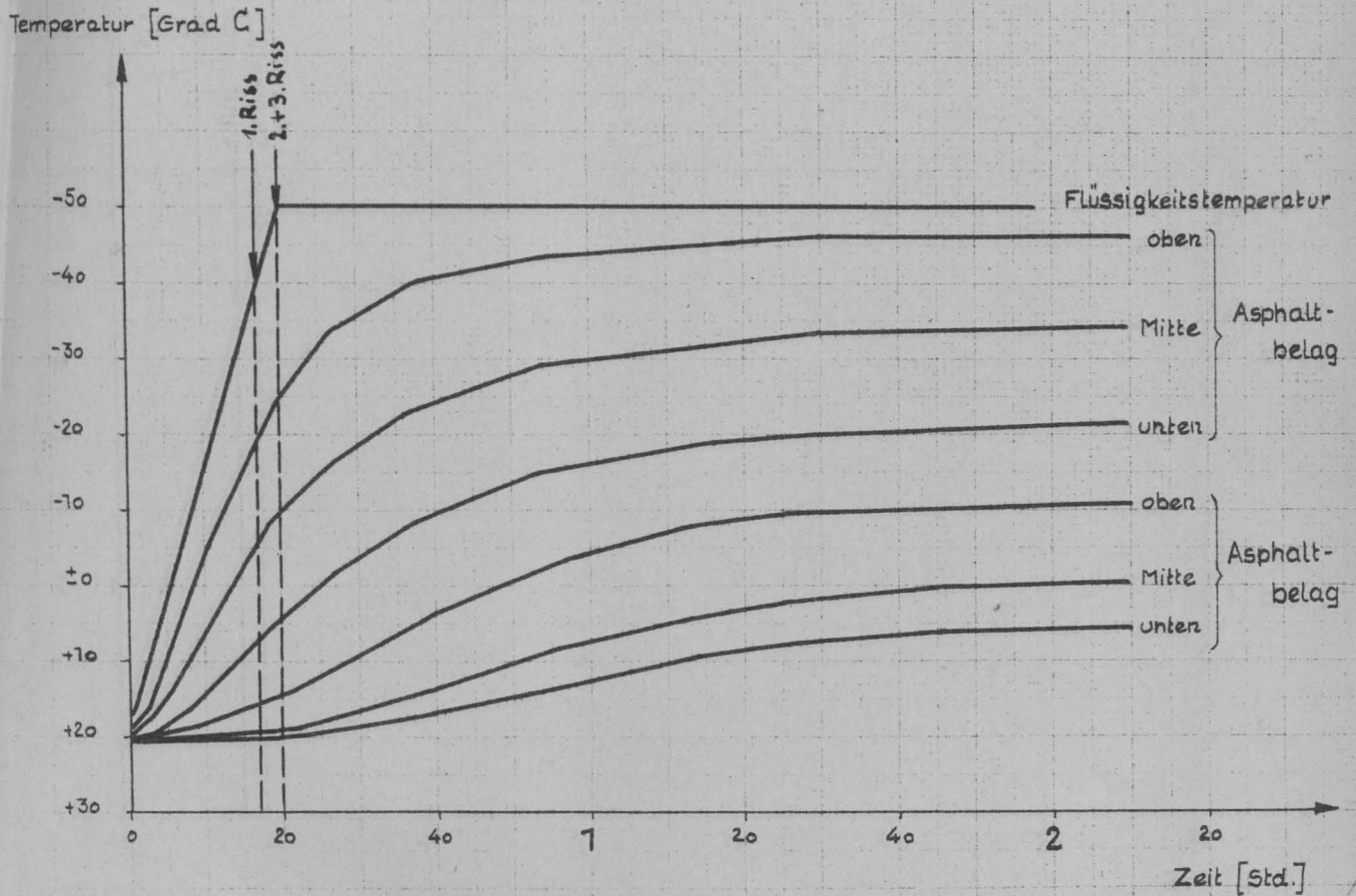
Material: I S O L I E R M A S T I X 22 % (J 22)Z a h l e n t a f e l

Lfd. Nr. des Belages	1	2	3	4	5	Mitte
O b e r f l ä c h e n r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten von Oberflächenrissen, in Min.	12	13	12	11	12	12
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-22	-26	-22	-19	-22	-22
Temp.an den Meßstellen im Asphalt	oben Mitte unten	- 8 + 4 +13	-11 + 1 +11	- 8 + 4 +13	- 6 + 5 +14	- 8 + 4 +13
H a u p t r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	17	19	16	16	19	18
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-39	-45	-36	-36	-45	-42
Temperatur an den Meßstellen im Asphalt, °C	oben Mitte unten	-18 - 5 + 7	-23 - 9 + 5	-17 - 4 + 8	-17 - 4 + 8	-23 - 9 + 5
Temperatur an der Belagsunterseite °C	+11	+ 9	+12	+12	+ 9	+10
Temp.Gefälle zwischen Ober- u.Unterseite des Asphaltbelages, in °C	50	54	48	48	54	52
Durchschnittstemp. °C = Temp.Meßst.Mitte	- 5	- 9	- 4	- 4	- 9	- 7
Anzahl der Haupt- risse	un- vollständig	1	2	2	1	2
	vollständig	1	1	1	1	

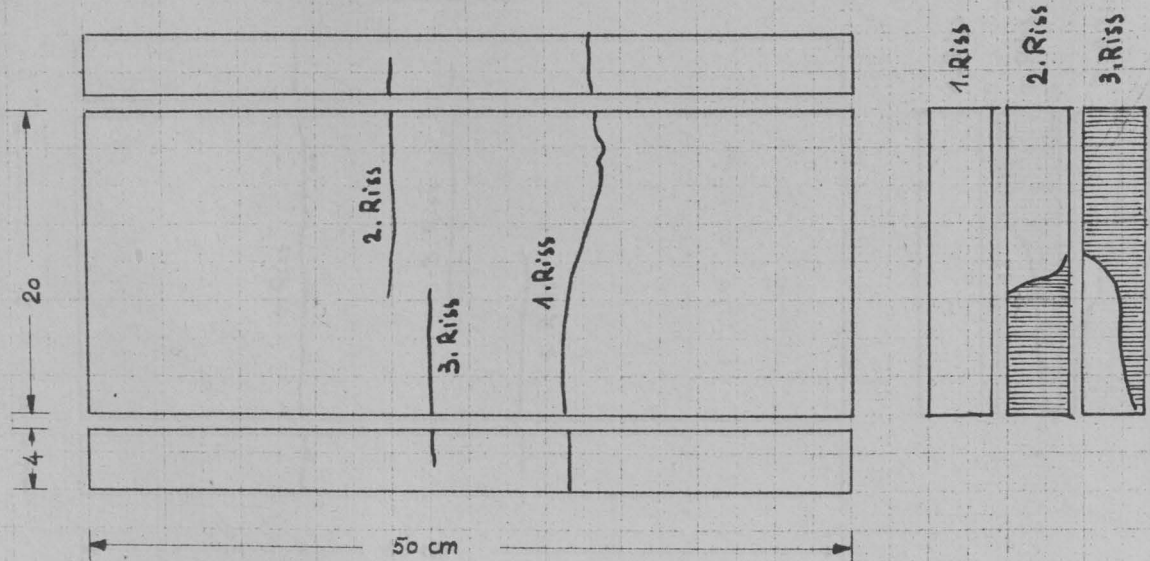
Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

JSOLIERMASTIX 22%

Belag 1

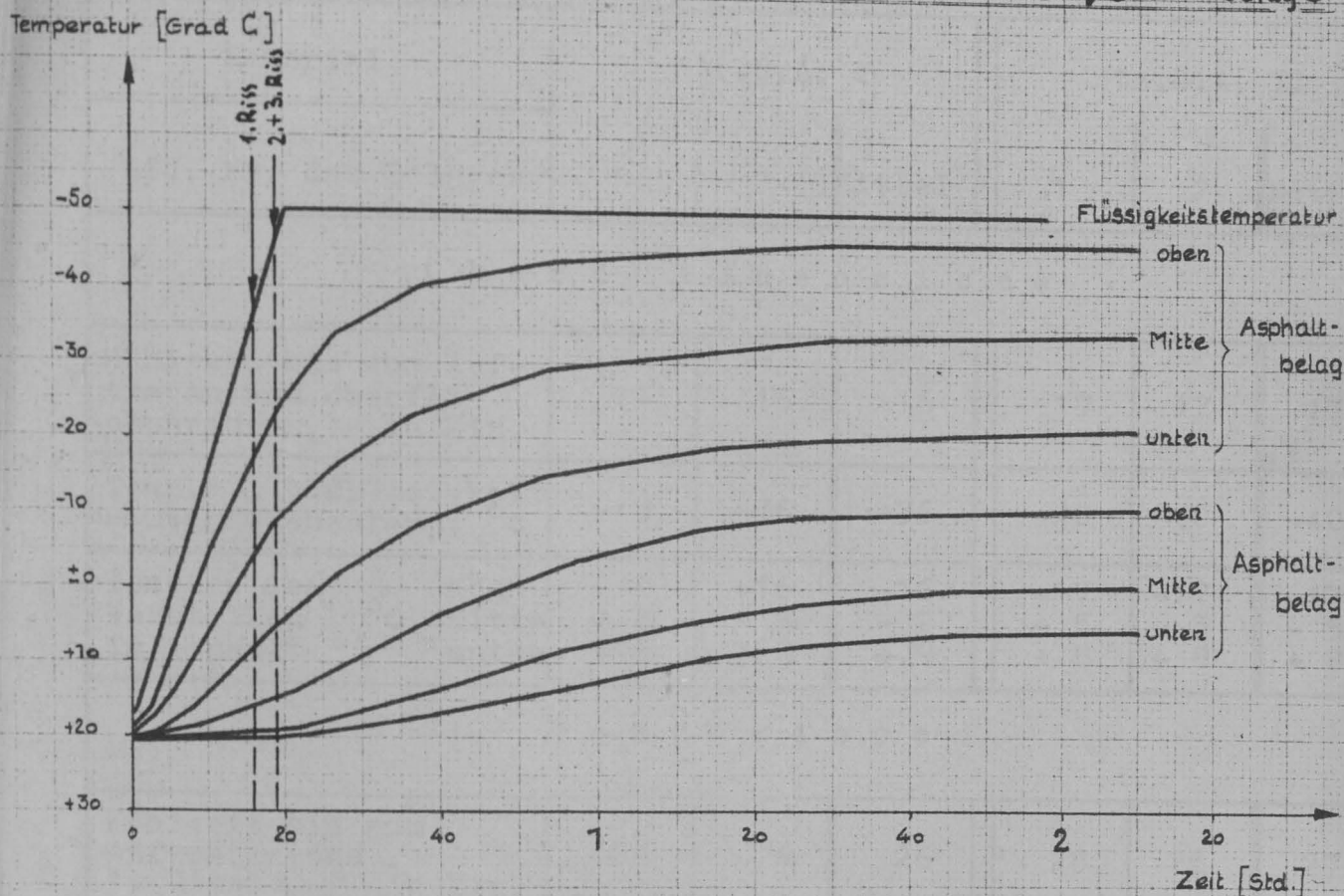


Rissbild

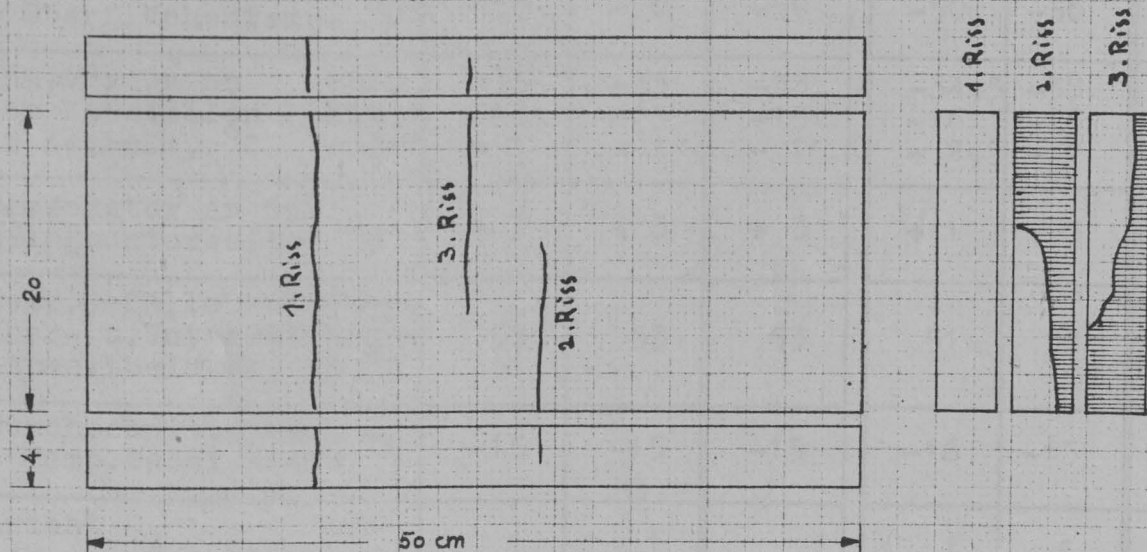


Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

JSOLIERMASTIX 22% Belag 3



Rissbild



Rißbildung an Prüfbelägen

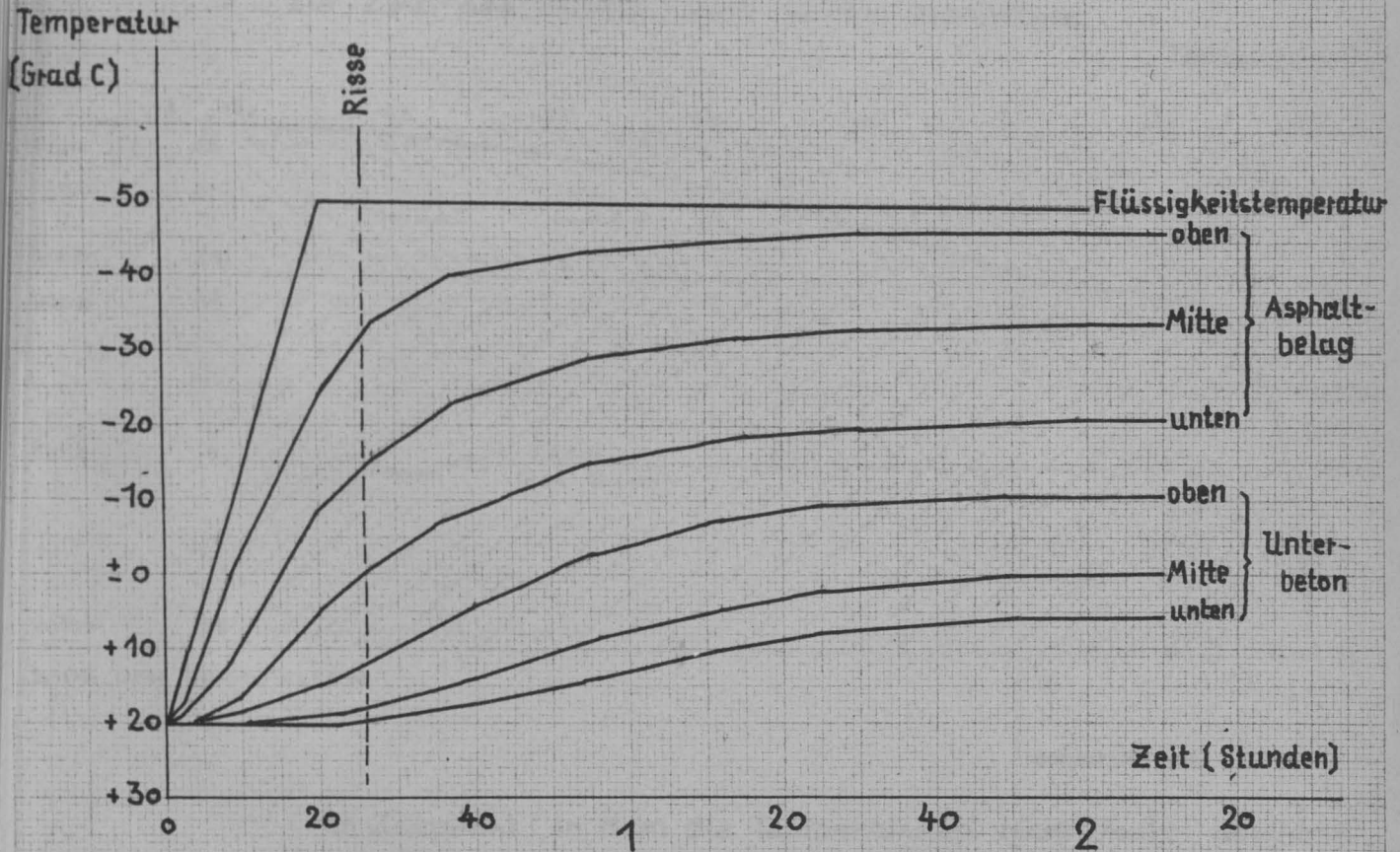
schnelle Abkühlung (70° C in 20 Minuten)

Material: S T R A S S E N G U S S A S P H A L T E I u. II
(Str.G.A.I u. II)Z a h l e n t a f e l 16

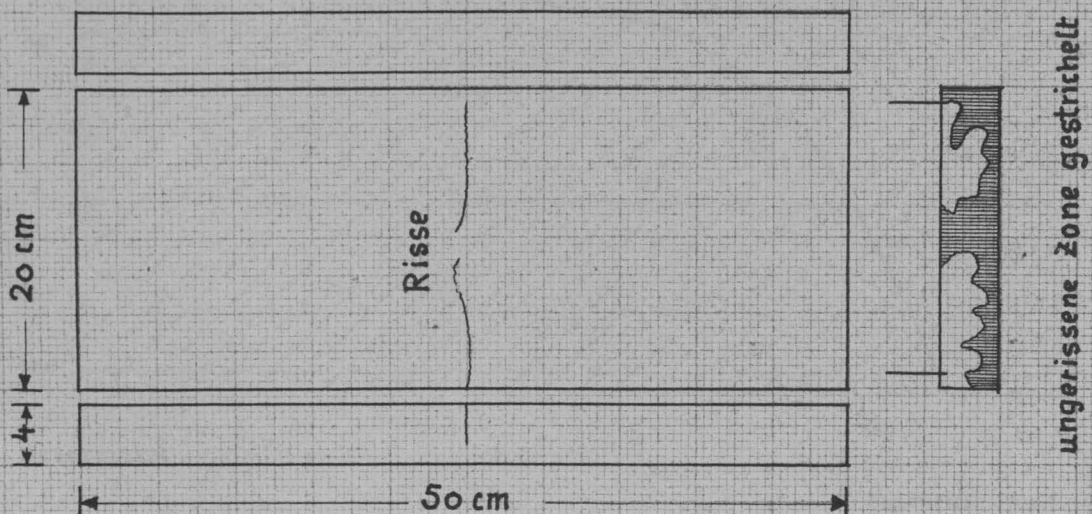
Material	Str.G.A. I			Str.G.A. II		
Lfd. Nr. des Belages	1	2	Mittel	1	2	Mittel
O b e r f l ä c h e n r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten von Oberflächenrissen, in Min.	11	16	16	17	17	17
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-19	-36	-36	-40	-40	-40
Temp.an den Meßstellen °C						
oben	- 6	-16	-16	-17	-17	-17
Mitte	+ 5	- 2	- 2	- 5	- 5	- 5
im Asphalt unten	+14	+ 9	+ 9	+ 8	+ 8	+ 8
H a u p t r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	26	26	26	28	26	27
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-50	-50	-50	-50	-50	-50
Temperatur an den Meßstellen °C						
oben	-33	-33	-33	-34,5	-33	-34
Mitte	-15	-15	-15	-16	-15	-16
im Asphalt, °C unten	- 1	- 1	- 1	- 2,5	- 1	- 2
Temperatur an der Belagsunterseite °C	+ 3	+ 3	+ 3	+ 1	+ 3	+ 2
Temp.Gefälle zwischen Ober- u.Unterseite des Asphaltbelages, in °C	53	53	53	51	53	52
Durchschnittstemp. °C = Temp.Meßst.Mitte	-15	-15	-15	-16	-15	-16
Anzahl der unvollständig Haupt- risse	1	1		1	1	
vollständig	-	-		-	-	

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

STRASSENGLASSASPHALT I Belag 1



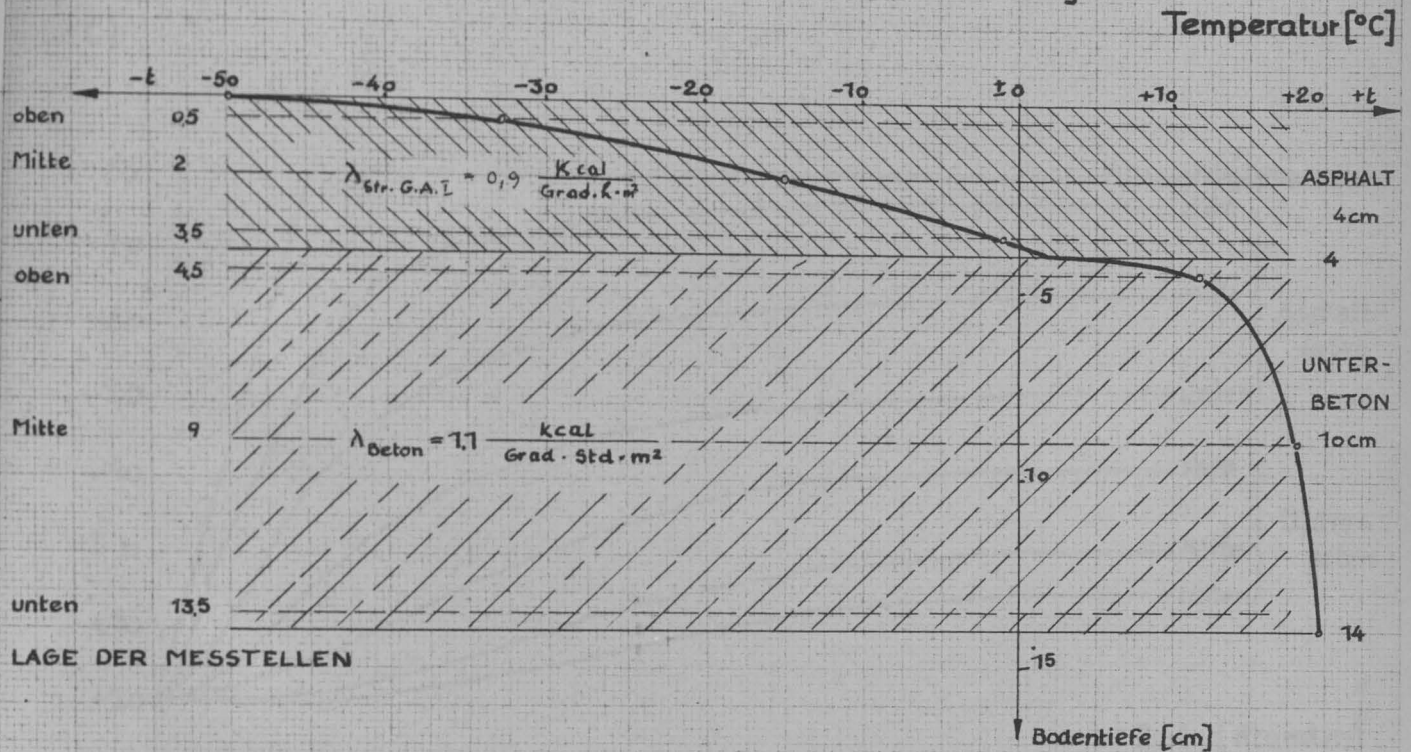
Rissbild



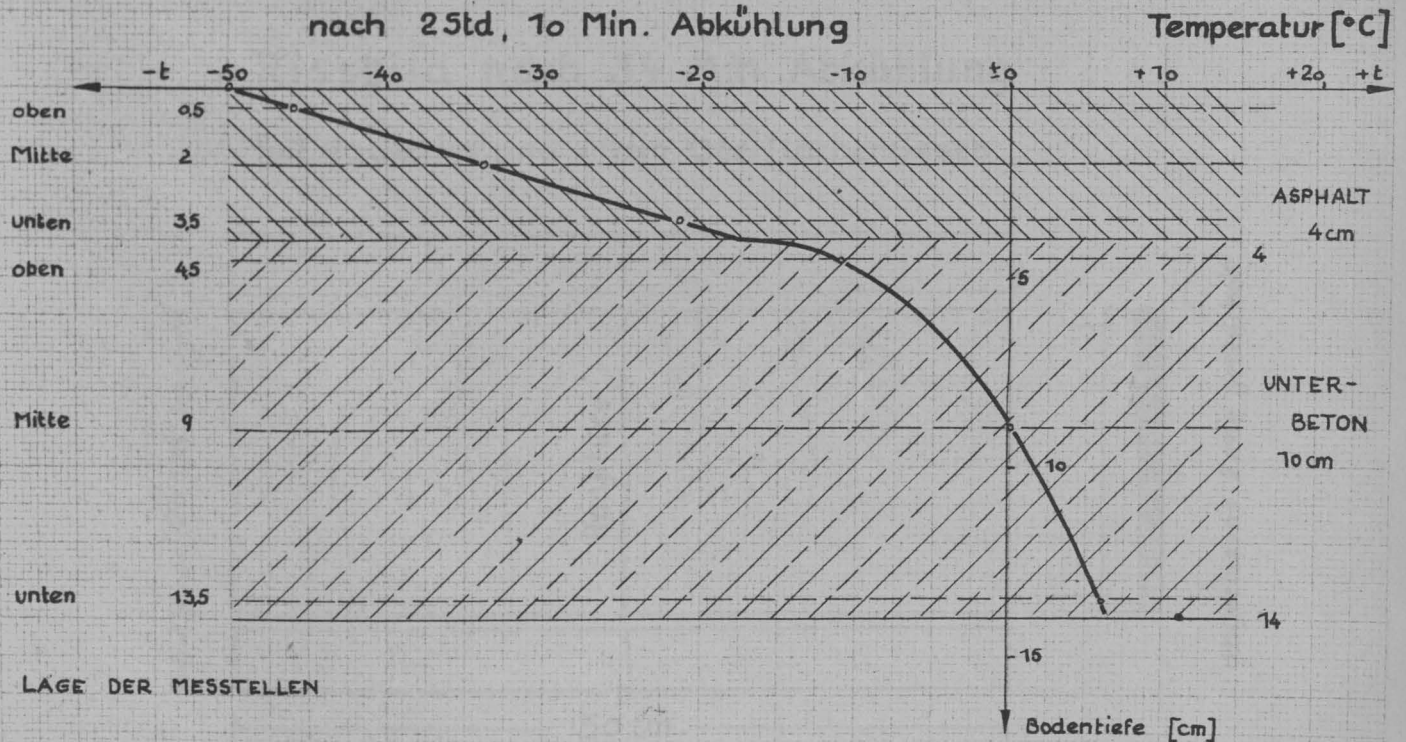
STRASSENGUSSASPHALT I Belag 1

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Beton bei -50° Oberflächentemperatur und schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

zur Zeit des Risses, nach 26 Min. Abkühlung

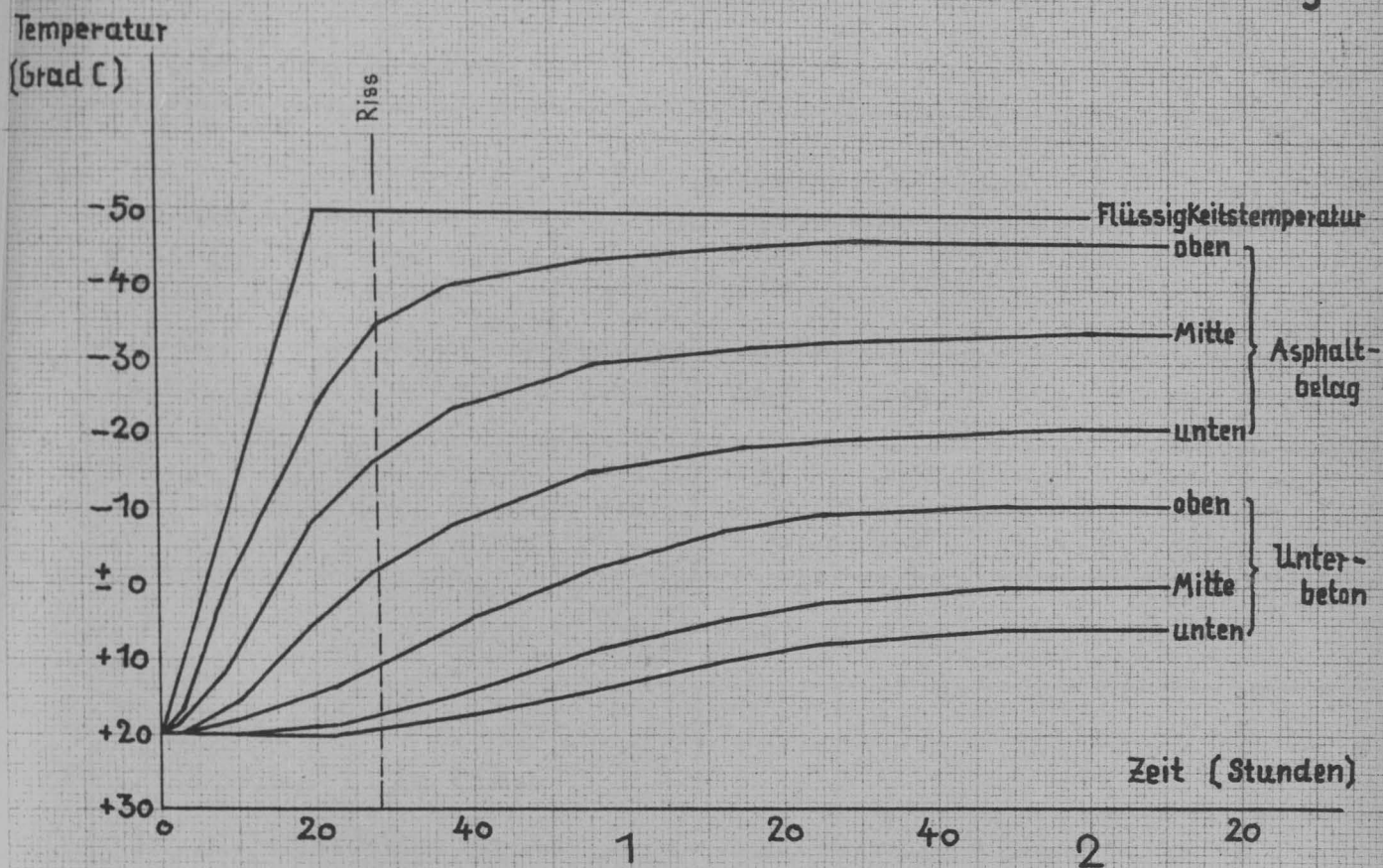


im Zeitpunkt, in dem die Temperaturen nicht mehr absinken nach 25td, 10 Min. Abkühlung



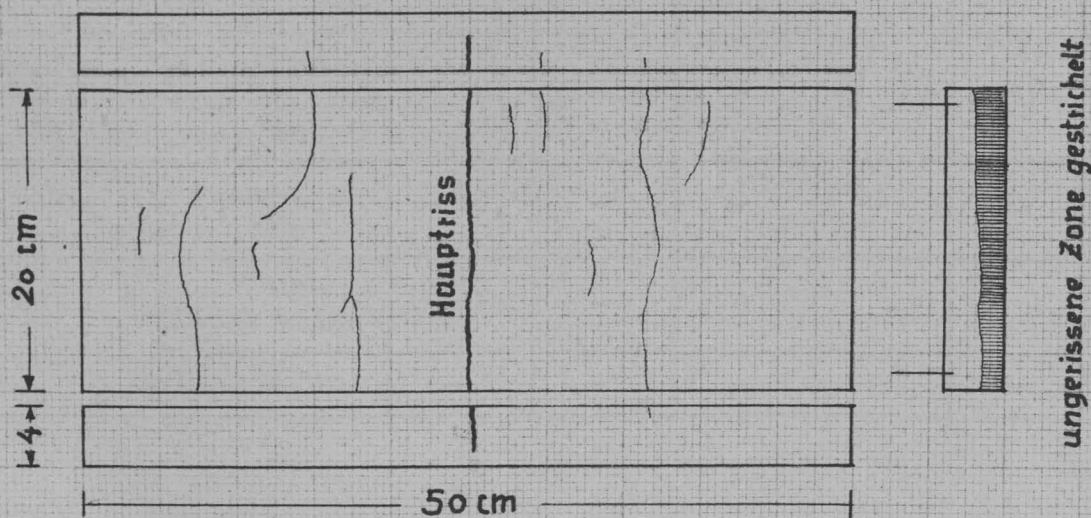
Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

STRASSENGUSSASPHALT II Belag 1



Rissbild nach 34 Min. Abkühlung

mit Hauptriss und wilden Oberflächenrissen



Temperaturbildung an Prüfbelägen

schnelle Abkühlung (70 °C in 20 Minuten)

Material: STRASSENBELAG GUSASPHALT III

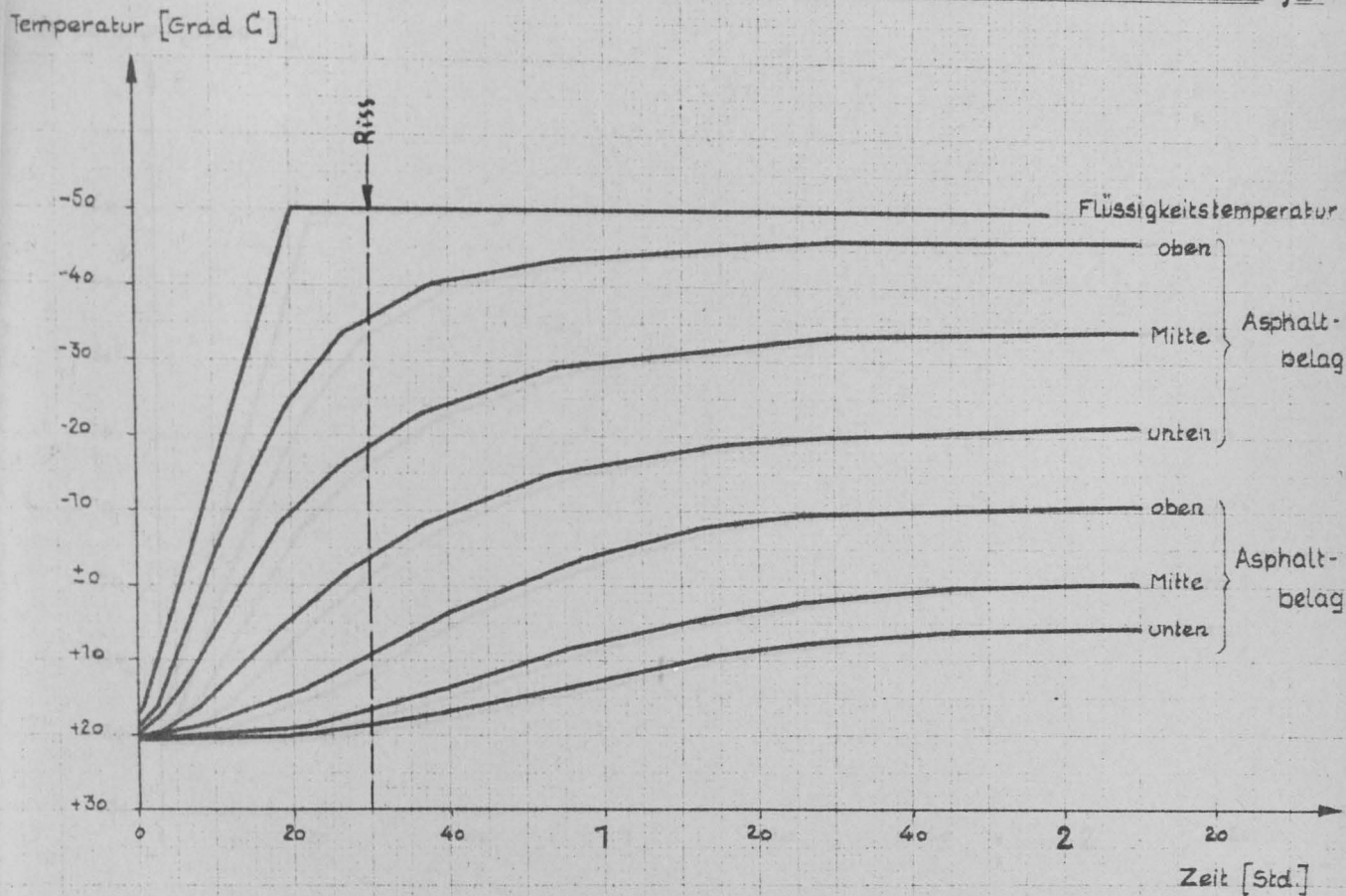
Z a l e n t a f e l 17 (Str.G.A.III)

Lfd. Nr. des Belages	1	2	3	4	5	Mitte
O b e r f l ä c h e n r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten von Oberflächenrissen, in Min.	23	18	17	21	23	20
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-50	-42	-39	-50	-50	-50
Temp.an den Meßstellen °C						
oben	-31	-21	-18	-26	-21	-25
Mitte	-12	-7	-5	-11	-12	-10
im Asphalt unten	+ 2	+ 6	+ 7	+ 4,5	+ 2	+ 4
H a u p t r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	30	-	-	21	36	-
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-50	-	-	-50	-50	-
Temperatur an den Meßstellen im Asphalt, °C						
oben	-36	-	-	-26	-39	-
Mitte	-18,5	-	-	-11	-23	-
unten	-4	-	-	+ 4,5	- 8	-
Temperatur an der Belagsunterseite °C	- 1	-	-	+10	- 5	-
Temp.Gefälle zwischen Ober- u.Unterseite des Asphaltbelages, in °C	49	-	-	60	47	-
Durchschnittstemp. °C = Temp.Meßst.Mitte	-18,5	-	-	-11	-23	-
Anzahl der Haupt- risse						
unvollständig	1	-	-	2	1	
vollständig	-	-	-	-	-	

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

STRASSENGUSSASPHALT III

Belag 1



Rissbild mit Oberflächenrissen

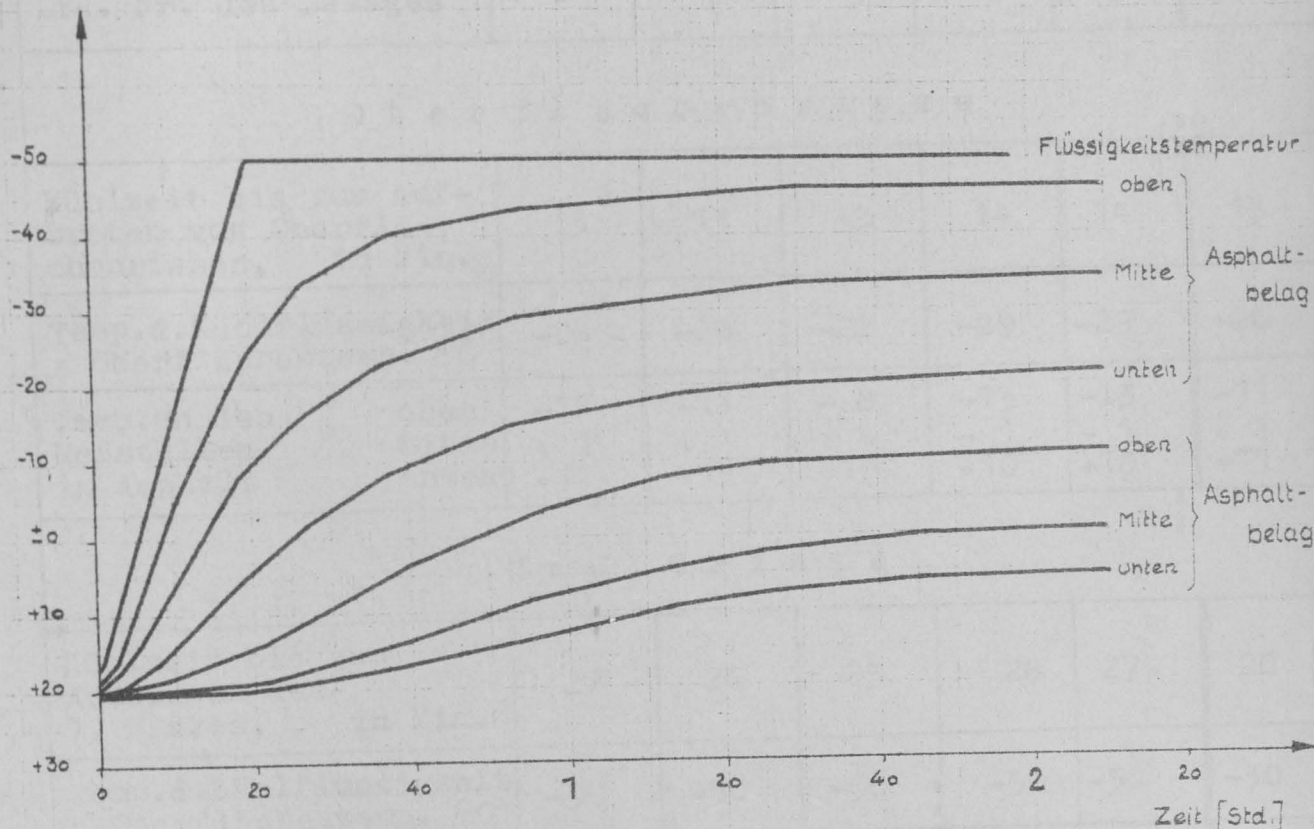


Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

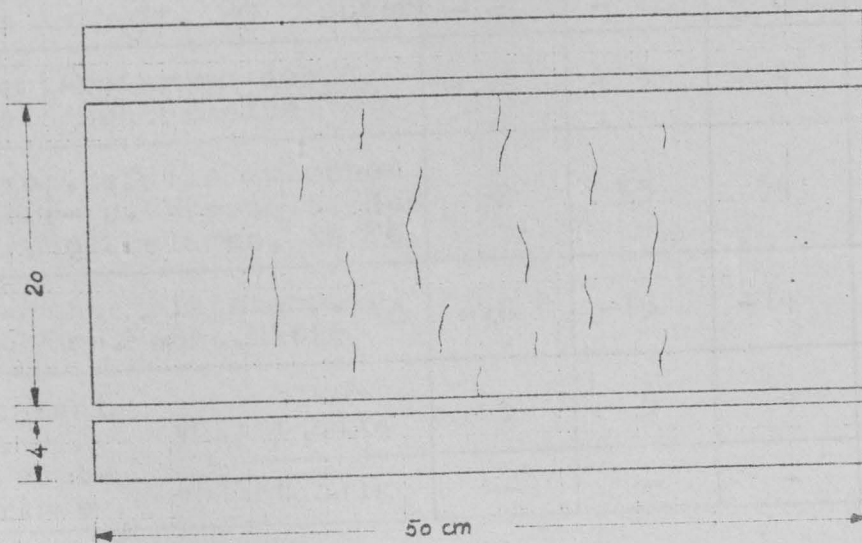
STRASSENGUSSASPHALT III

Belag 3

Temperatur [Grad C]



Rissbild, nur Oberflächenrisse



Rißbildung an Prüfbelägen

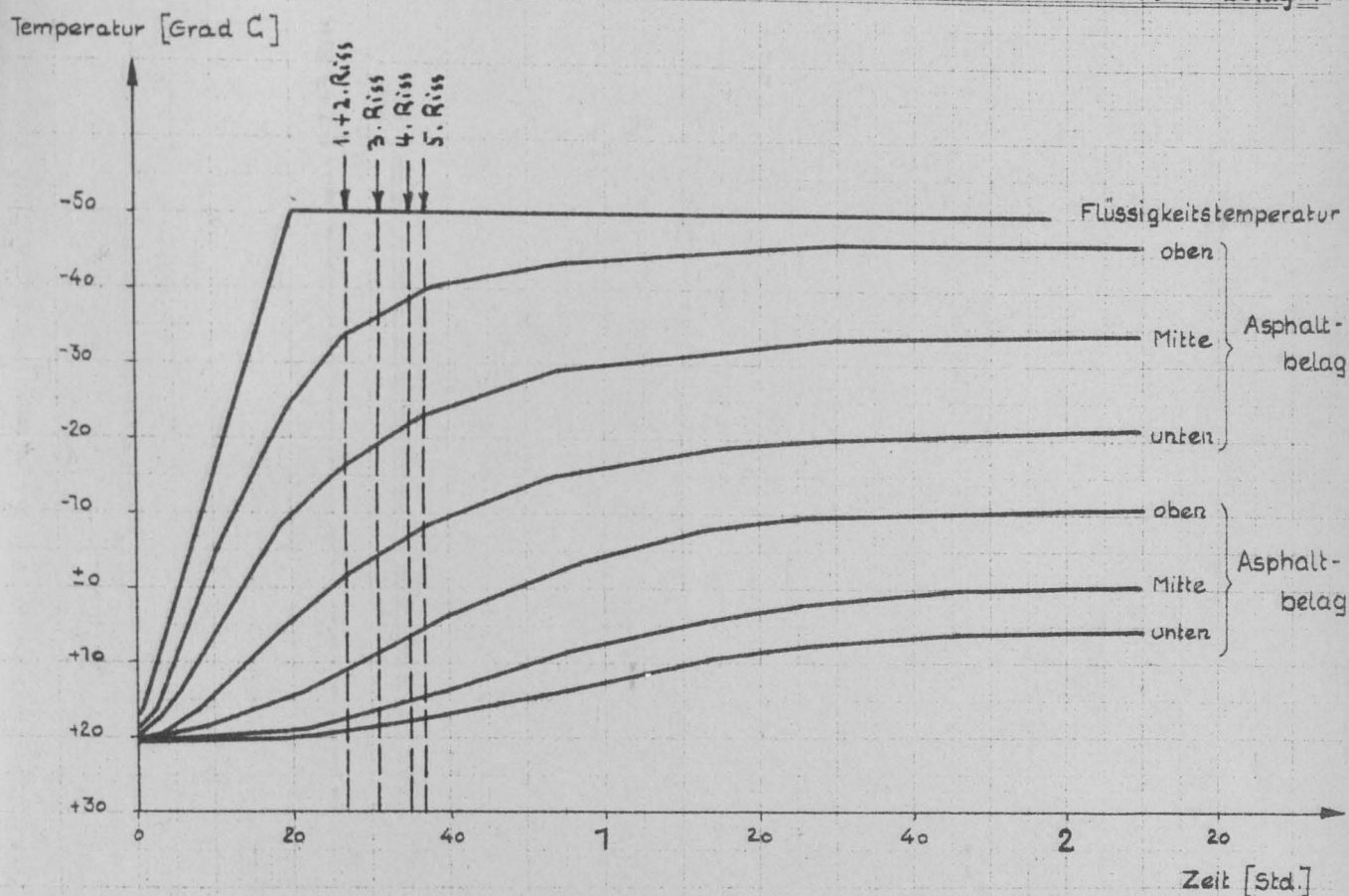
schnelle Abkühlung (70 °C in 20 Minuten)

Material: Gußasphalt " A V O L A - M A S T I F I X "Z a h l e n t a f e l 18 (Avola)

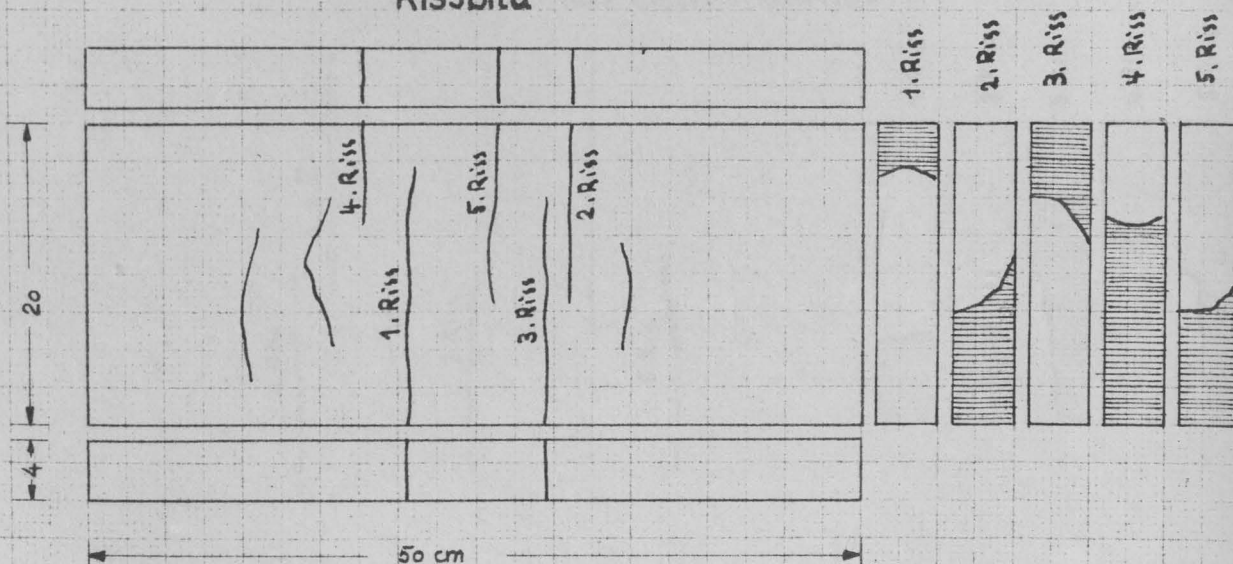
Lfd. Nr. des Belages	1	2	3	4	5	Mitte
O b e r f l ä c h e n r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten von Oberflächenrissen, in Min.	13	13	12	14	14	13
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-26	-26	-22	-29	-29	-26
Temp.an den Meßstellen im Asphalt						
oben	-11	-11	- 8	-13	-13	-11
Mitte	+ 1	+ 1	+ 4	- 1	- 1	+ 1
unten	+11	+11	+13	+10	+10	+11
H a u p t r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	27	26	25	26	27	26
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-50	-50	-50	-50	-50	-50
Temperatur an den Meßstellen im Asphalt, °C						
oben	-34	-33	-32	-33	-34	-33
Mitte	-16	-15	-14	-15	-16	-15
unten	- 2	- 1	+ 0	- 1	- 2	- 1
Temperatur an der Belagsunterseite °C	+ 2	+ 3	+ 4	+ 3	+ 2	+ 3
Temp.Gefälle zwischen Ober- u.Unterseite des Asphaltbelages, in °C	52	53	54	53	52	53
Durchschnittstemp. °C = Temp.Meßst.Mitte	-16	-15	-14	-15	-16	-15
Anzahl der unvollständig	5	5	4	3	5	
Haupt- risse vollständig	-	-	-	1	-	

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

GUSSASPHALT "AVOLA-MASTIFIX" Belag 1

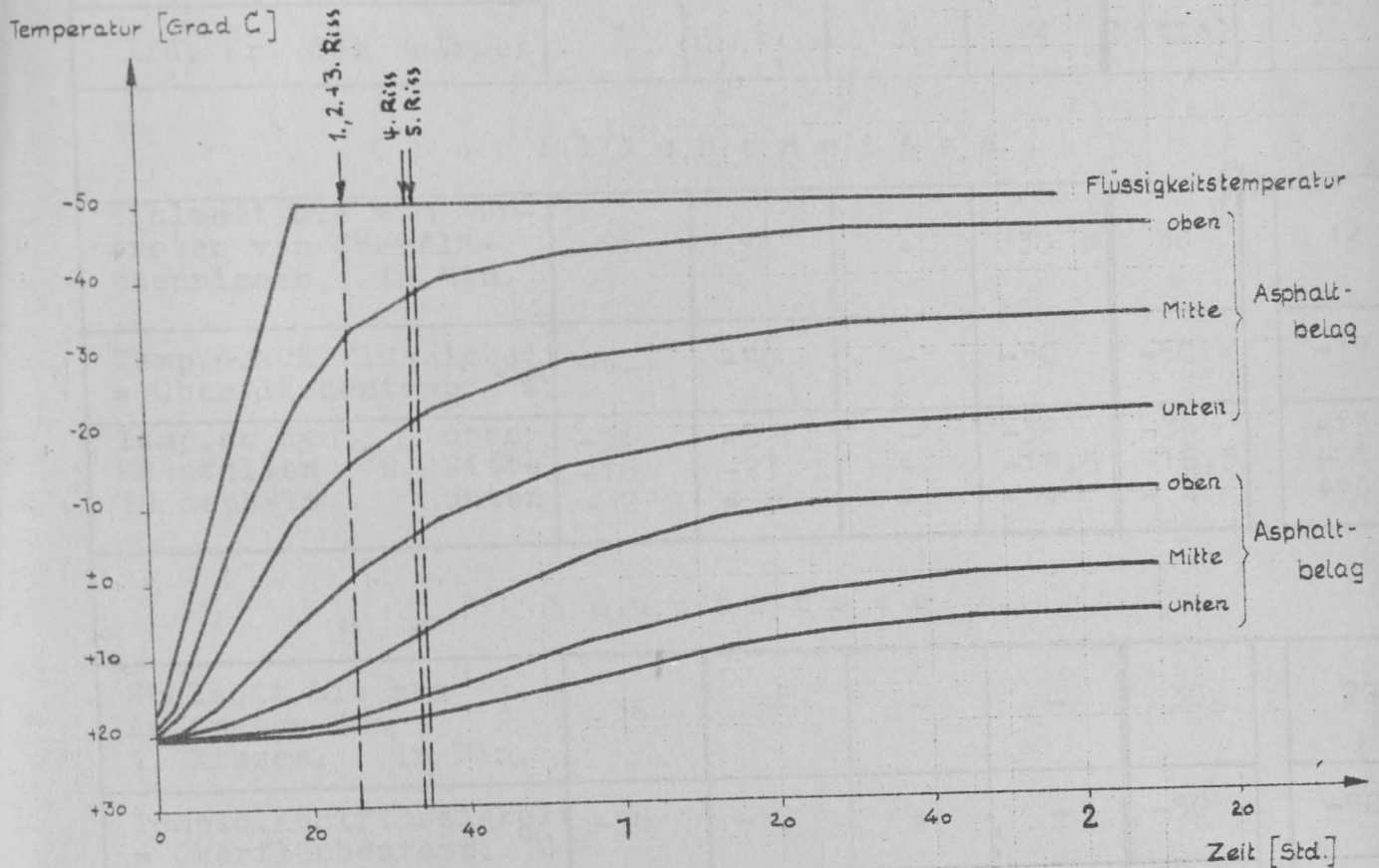


Rissbild

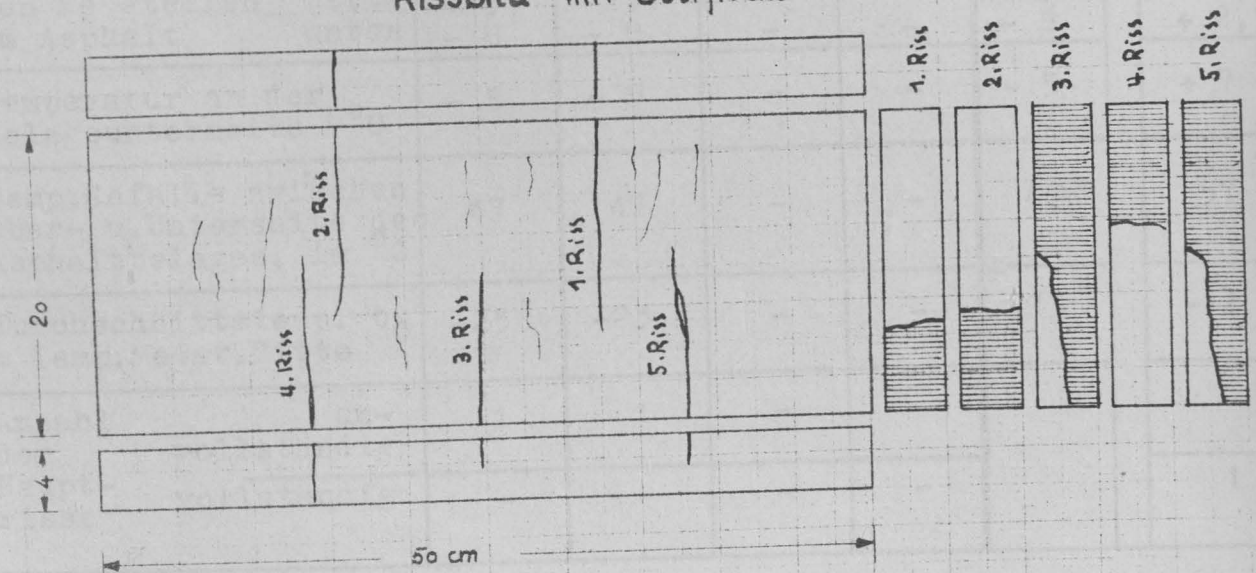


Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

GUSSASPHALT "AVOLA-MASTIFIX" Belag 2



Rissbild mit Oberflächenrissen



Rißbildung an Prüfbelägen

schnelle Abkühlung (70°C in 20 Minuten)

Material: D A C H M A S T I X I und II

(Dachm. I u. II)

Z a h l e n t a f e l 19

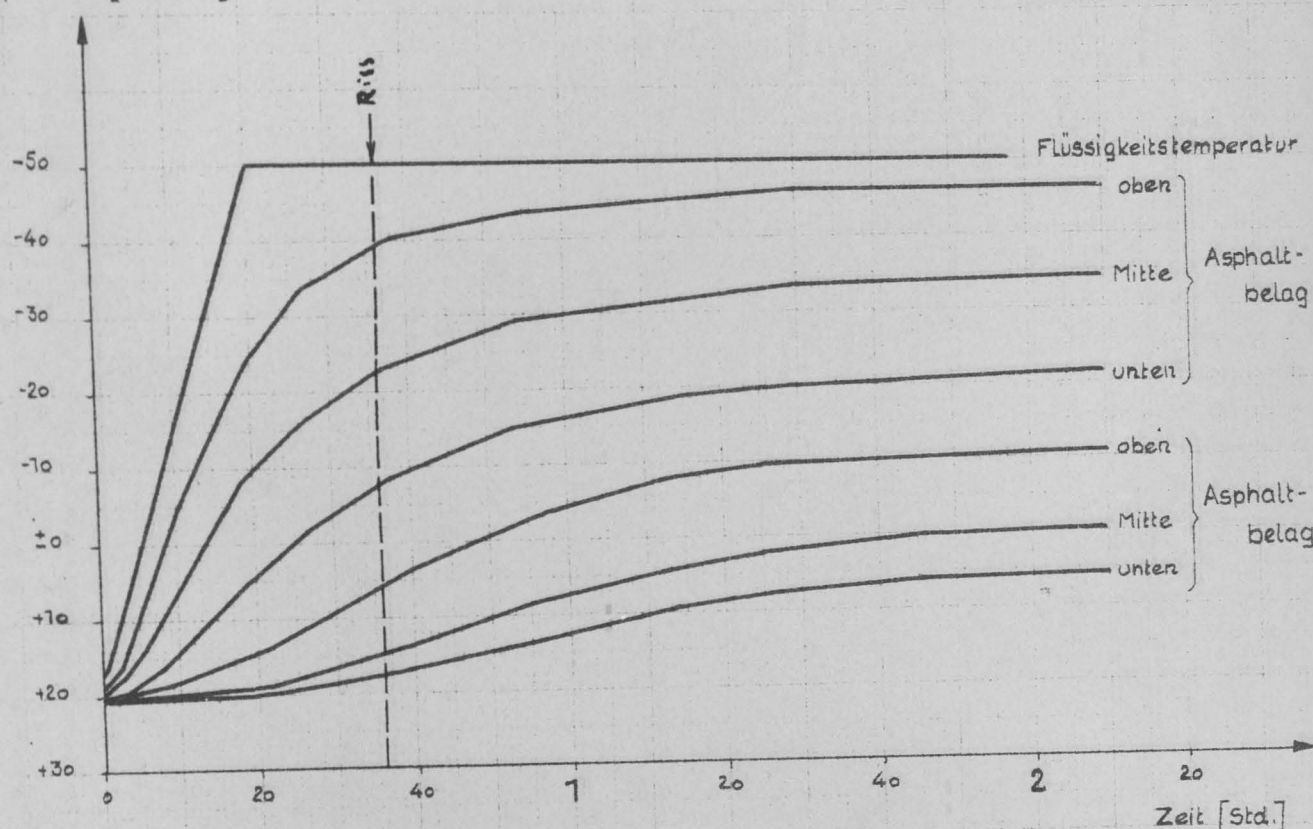
Material	Dachmastix I					Dachm. II
Lfd. Nr. des Belages	1	2	3	4	Mittel	
O b e r f l ä c h e n r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten von Oberflächenrissen, in Min.	27	36	-	30	30	14
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-50	-50	-	-50	-50	-29
Temp.an den Meßstellen °C						
oben	-34	-39	-	-36	-36	-13
Mitte	-16	-23	-	-18,5	-18,5	-1
im Asphalt unten	-2	-8	-	-4	-4	+10
H a u p t r i s s e						
Kühlzeit bis zum Auftreten des 1. Risses, in Min.	36	36	-	-	36	22
Temp.d.Kühlflüssigkeit = Oberflächentemp. °C	-50	-50	-	-	-50	-50
Temperatur an den Meßstellen im Asphalt						
oben	-39	-39	-	-	-39	-27
Mitte	-23	-23	-	-	-23	-12
unten	-8	-8	-	-	-8	+2,5
Temperatur an der Belagsunterseite °C	-5	-5	-	-	-5	+7
Temp.Gefälle zwischen Ober- u.Unterseite des Asphaltbelages, in °C	47	47	-	-	47	57
Durchschnittstemp. °C = Temp.Meßst.Mitte	-23	-23	-	-	-23	-12
Anzahl der Haupt- risse						
unvollständig	1	1	-	-		-
vollständig	-	-	-	-		1

Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

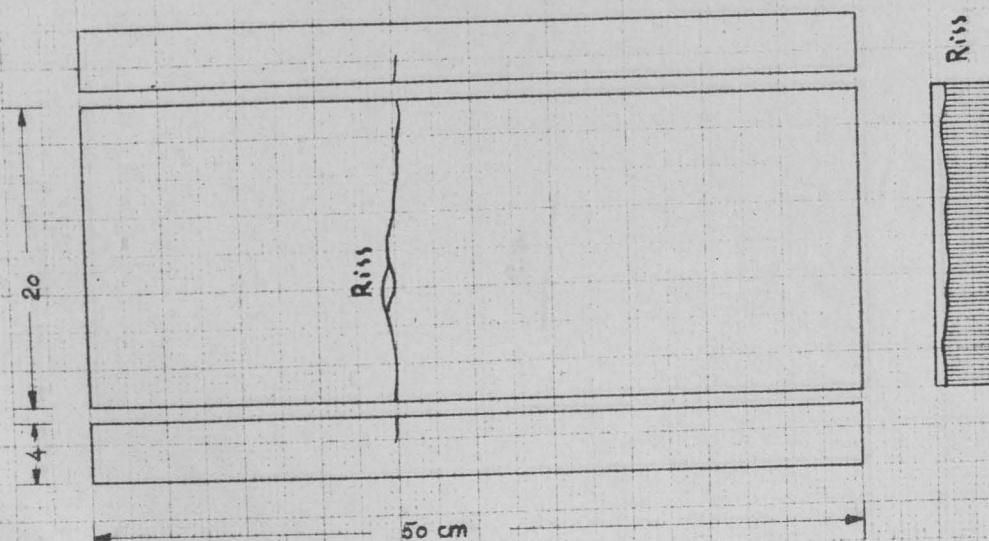
DACHMASTIX I

Belag 1

Temperatur [Grad C]



Rissbild

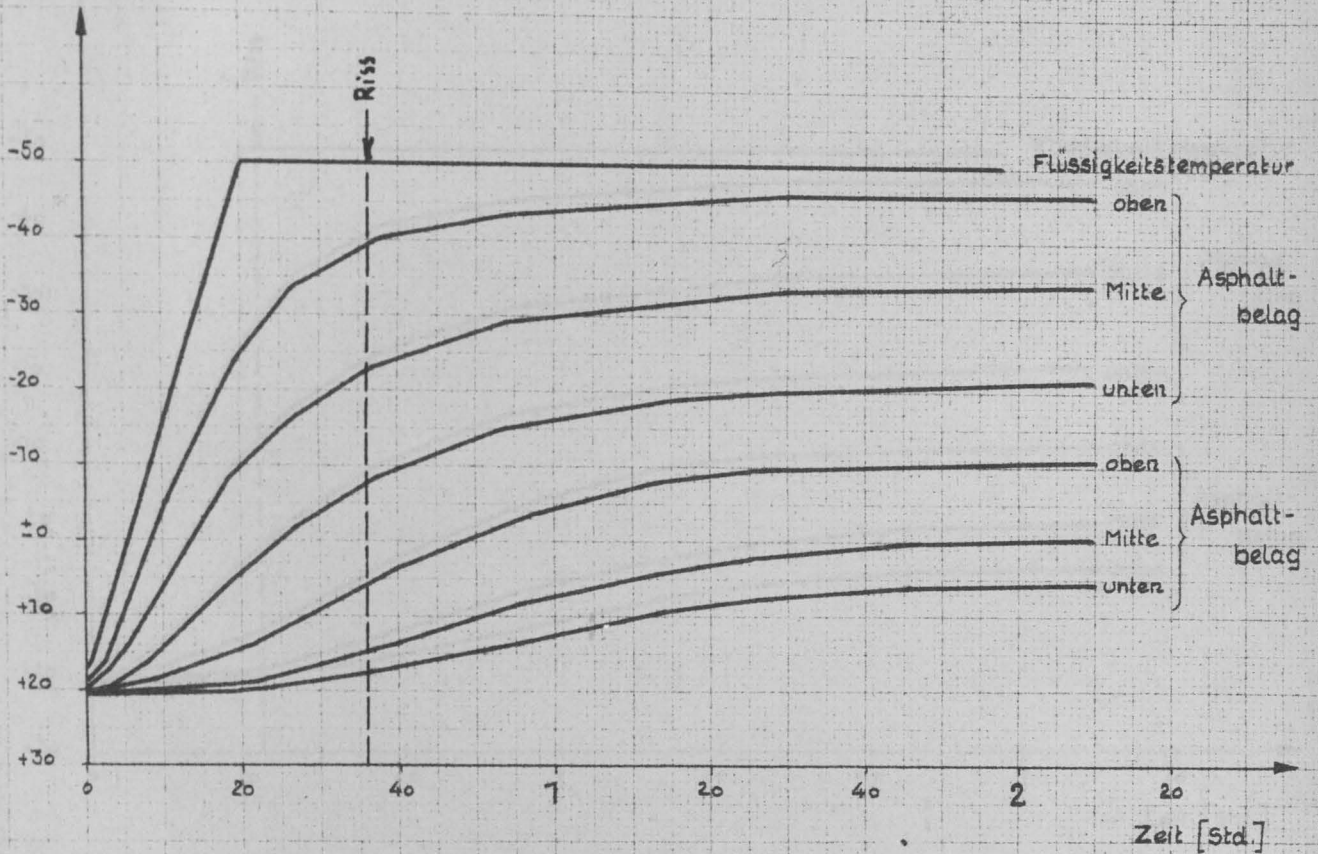


Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

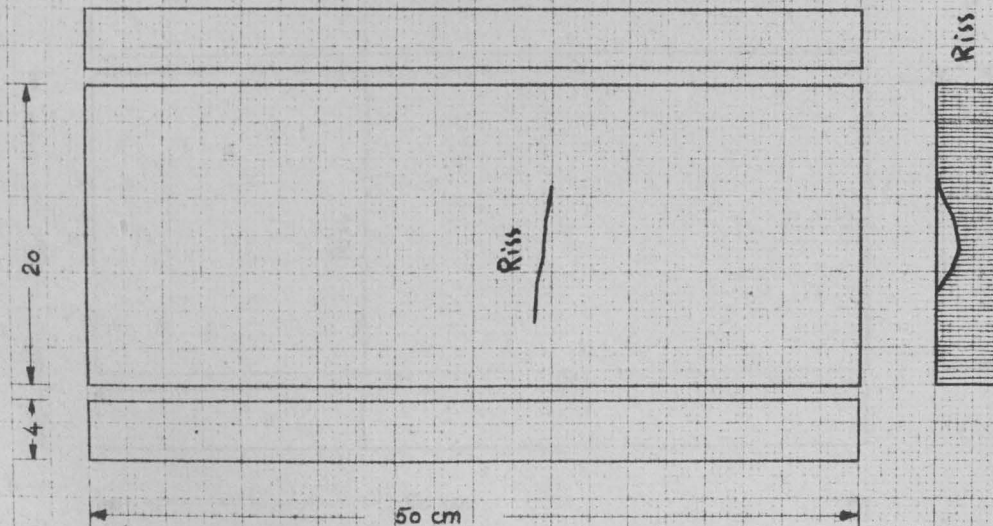
DACHMASTIX I

Belag 2

Temperatur [Grad C]

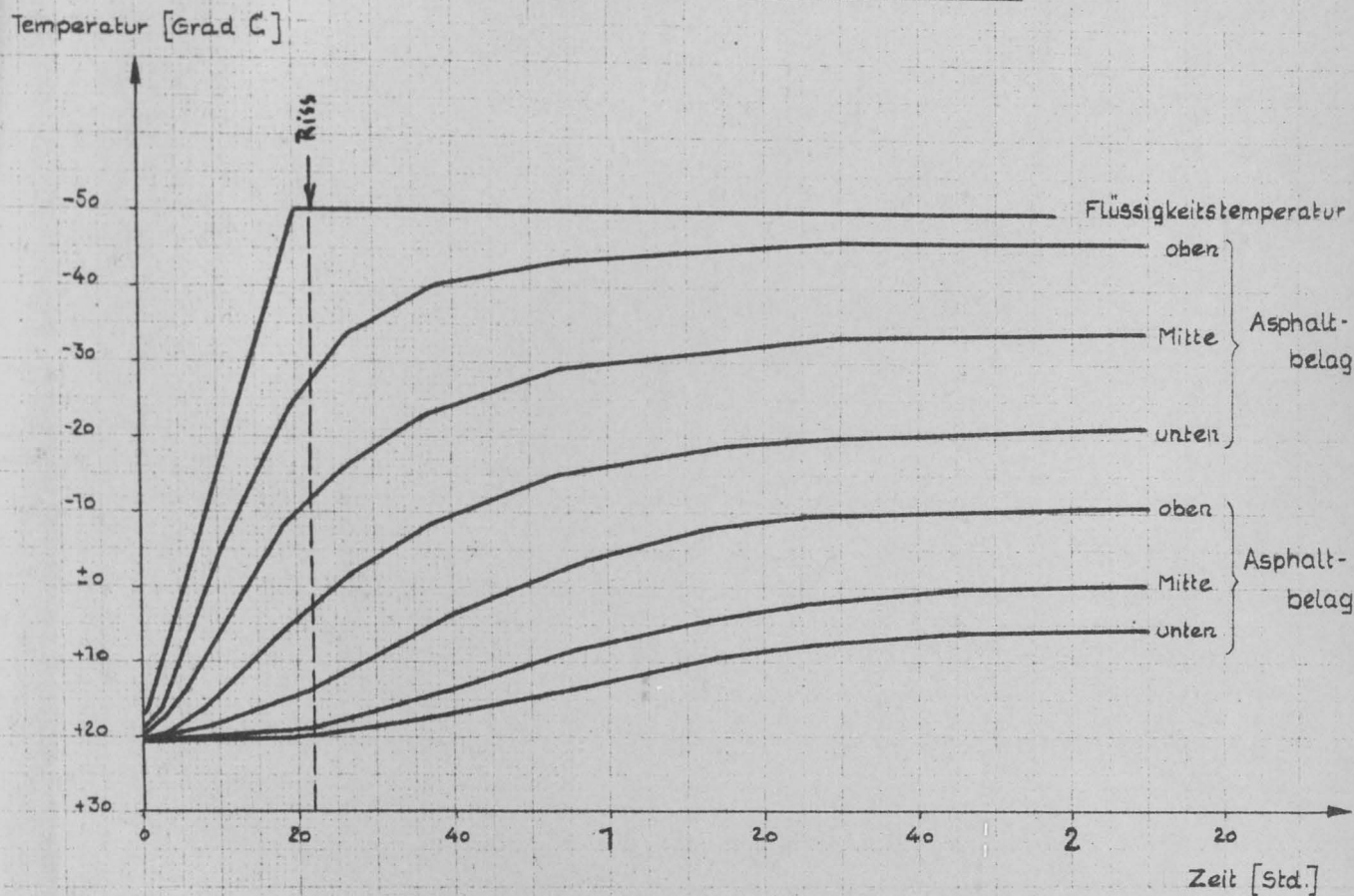


Rissbild

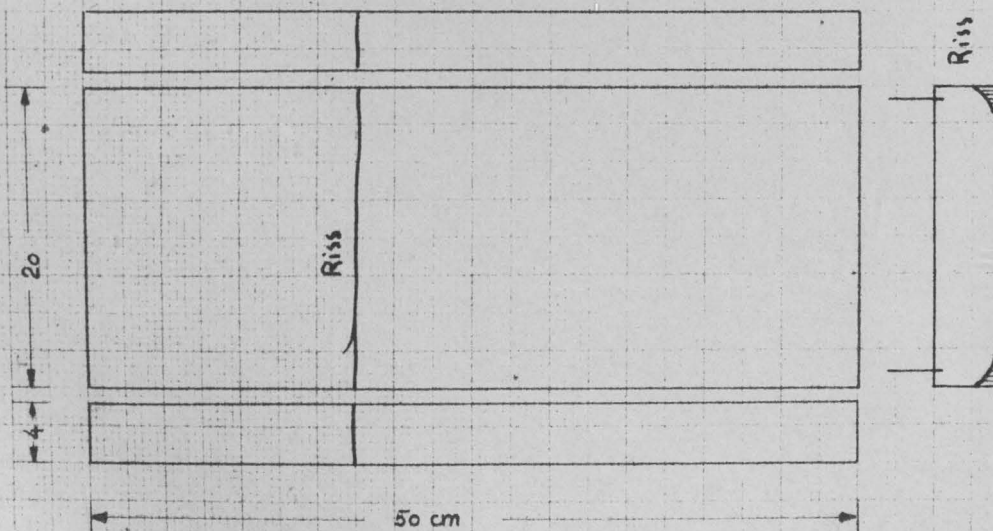


Temperaturverlauf im Asphaltbelag und im Unterbeton bei schneller Abkühlung (70° in 20 Min.)

DACHMASTIX II



Rissbild

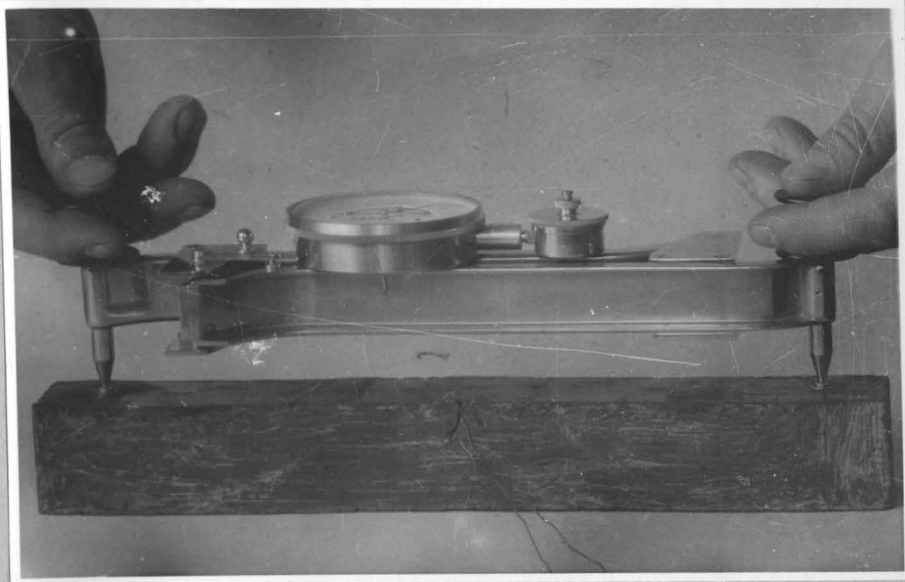


Berechnung der Bruchspannung bei Rißbildung im Bereich überwiegend elastischer und gedämpft-elastischer Formänderungen

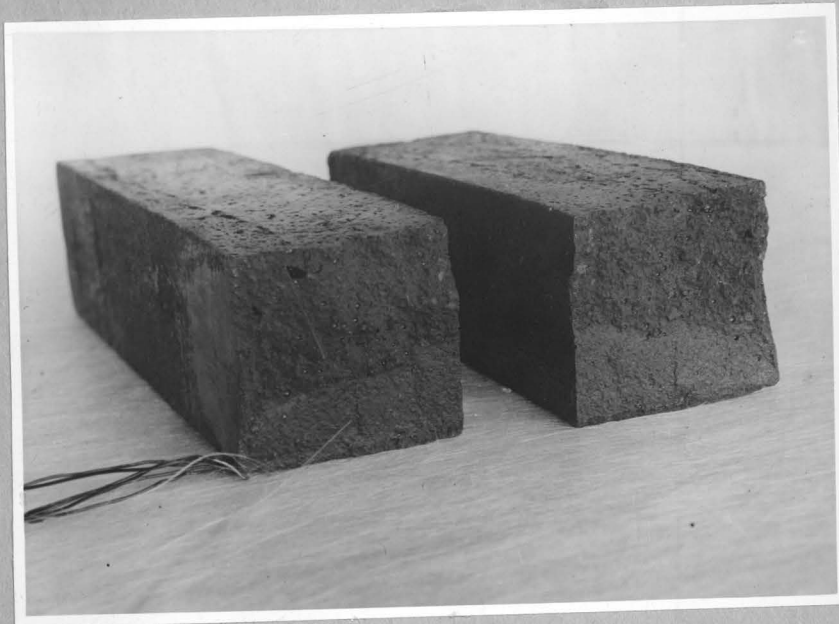
Z A H L E N T A F E L 25

Material	mittlere Kühlzeit bis zum 1. Riss Min.	Temp.-- Meßstell. 'oben' beim 1. Riss t_{RiB} °C	Spannungsberechnung, wenn plastische Formänderung = 10 % der Gesamtformänderung								Spannungsberechnung für geschätzten Trennpunkt		einen nach dem Kurvenverlauf des plast./elast. Bereichs			
			Temp. im Trennpunkt des pl/el. Bereichs $t_{\text{pl/el.}}$ °C	$\Delta t =$ $t_{\text{RiB}} -$ $t_{\text{pl/el}}$ (3 - 4) °C	Ausdehnungskoeffizient für $\alpha \cdot 10^{-6}$ die Temp. Bereiche °C	ϵ (5 - 6)	E $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	$\sigma_{\text{Z Bruch}}$ (7 - 8) $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	Temperatur im Trenn- punkt des plastisch/ /elastisch. Bereichs $t_{\text{pl/el}}$ °C	Anteile der plastischen Formänderung an der Gesamt- formänderung %	$\Delta t =$ $t_{\text{RiB}} -$ $t_{\text{pl/el}}$ (3 - 10) °C	ϵ (6 - 12)	$\sigma_{\text{Z Bruch}}$ (8 - 13) $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$			
1	2	3	4	5	6				7	8	9	10	11	12	13	14
H 12	18	- 21	- 20	1	54,5	45	36,5	29	0,000 036	62 000	2	- 15	13	6	0,000 261	16
H 16	24	-31,5	- 25	6,5	59,5	49	40	31,5	0,000 247	55 000	14	- 20	14	11,5	0,000 447	25
J 16	21	- 26	- 21	5	62,5	51,5	41,5	33,5	0,000 208	50 000	10	- 22	8	8	0,000 166	8
J 22	18	- 21	- 24	(-3)	80,5	65	51	38,5	-	44 000	-	- 30	7	(-9)	-	-
Avola	26	- 33	- 10	23	43,5	36	29,5	26	0,000 731	75 000	55	- 10	10	23	0,000 733	55
Str.GA. I	26	- 33	- 23	10	35	29,5	25	21	0,000 238	83 000	20	- 10	16	23	0,000 608	50
" II	27	- 34	- 40	(-6)	42,5	35,5	28,5	23	-	77 000	-	- 15	24	19	0,000 555	43
" III	(30)	(- 36)	- 9	27	36,5	31	26,5	23,5	0,000 763	84 000	64	- 12	8	24	0,000 654	55
Dachm. I	(36)	(- 39)	- 50	(-11)	54,5	44,5	35,5	27	-	55 000	-	- 23	19	16	0,000 492	27
" II	22	- 27	- 20	7	66	54	43	34	0,000 301	61 000	18	- 12	13	15	0,000 733	45

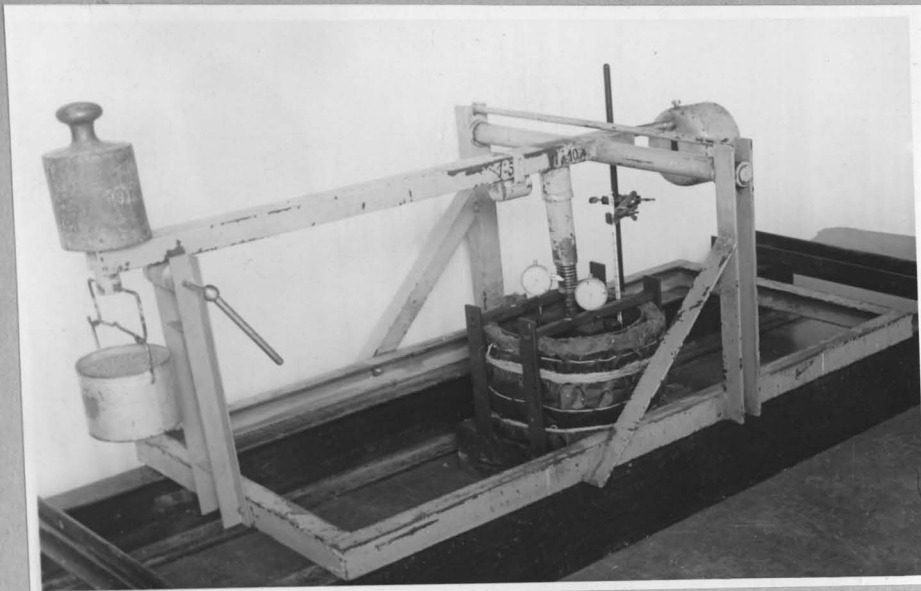
Messung des Ausdehnungskoeffizient mit dem
Huggenber'schen Deformeter



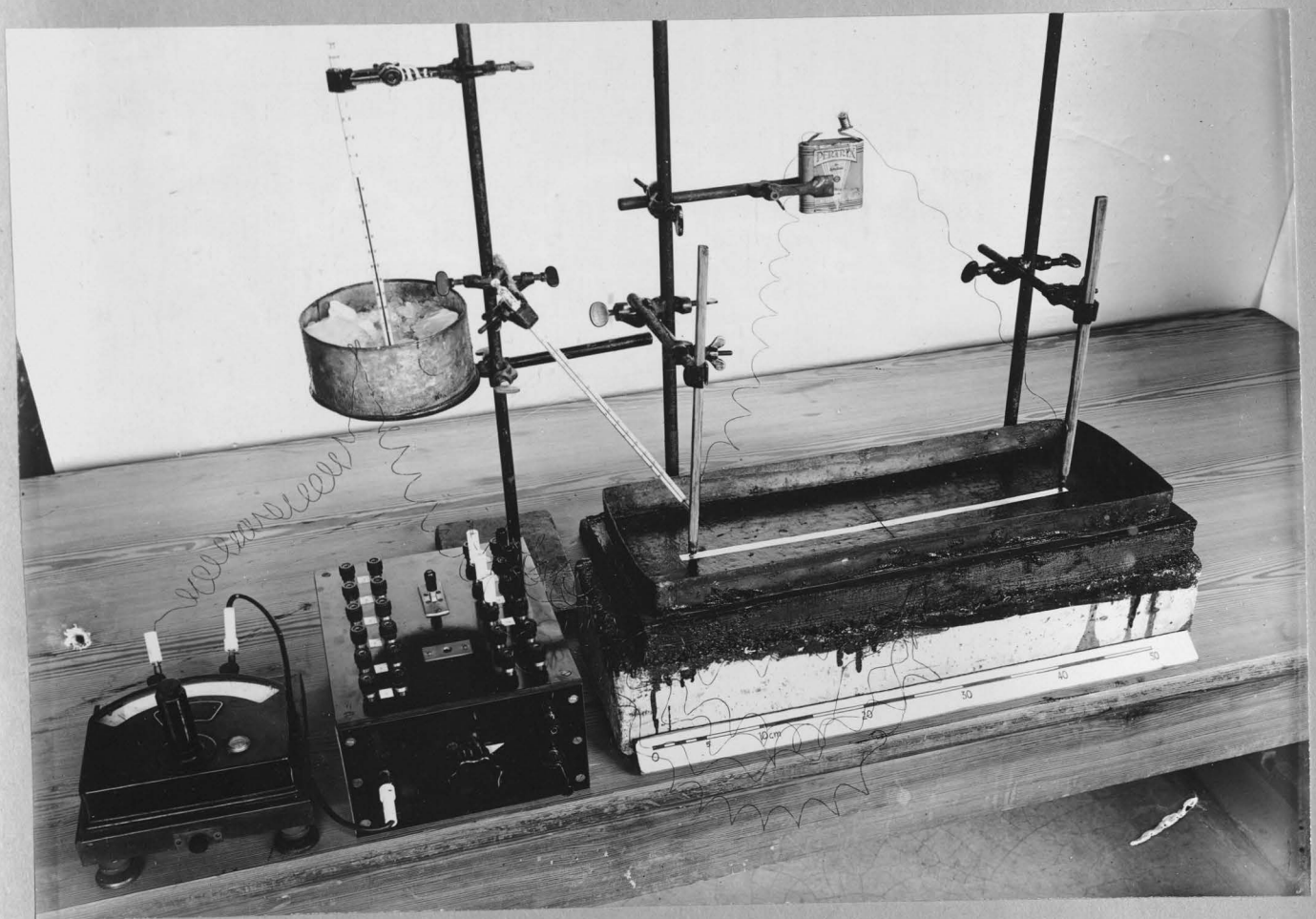
R i s s b i l d H 16 %



Einseitige Abkühlung von unten her,
Zugzone (untere Zone) gerissen, im Quer-
schnitt hell



Versuchsanordnung zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls und zur Abgrenzung der Verformungsanteile



Versuchsanordnung Prüfbeläge

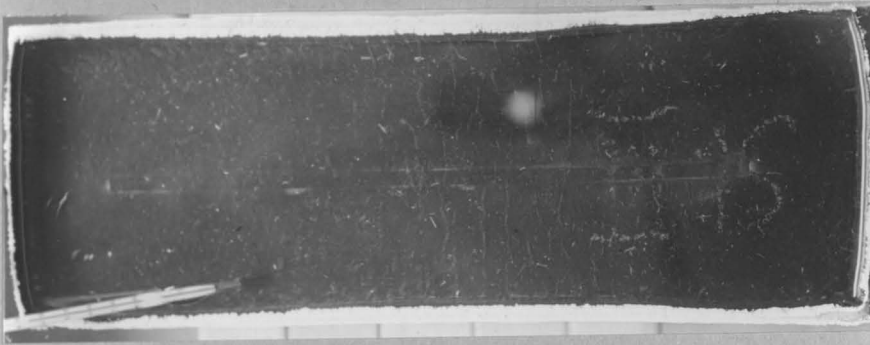
Messgerät u. Schaltkasten
für Thermoelemente
darüber Vergleichsmeßstelle 0°C

Prüfbelag mit Riss in der Mitte
Rissanzeige durch Folie mit
Glühbirne

R i s s b i l d e r



Oberflächenrisse: erstes Auftreten
Straßengußasphalt III

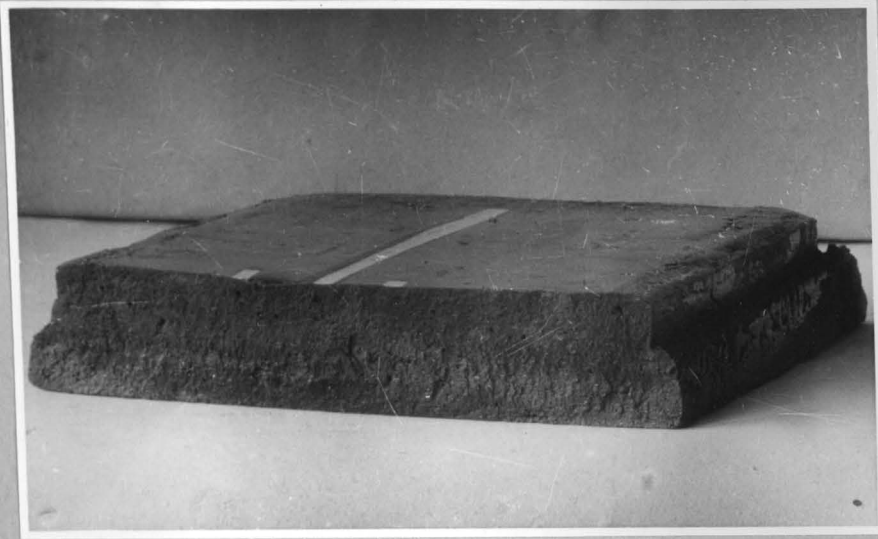


Oberflächenrisse: endgültiges Rissbild
Straßengußasphalt III

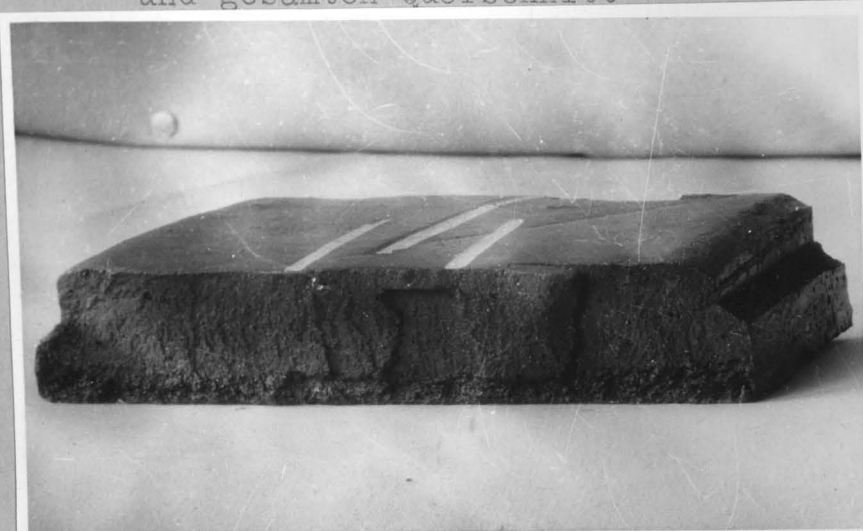


Hauptrisse: ein vollständiger, ein unvoll-
ständiger
Hartmastix 16 %

R i s s b i l d H 12 %



Vollständiger Riss über gesamte Belagsbreite
und gesamten Querschnitt

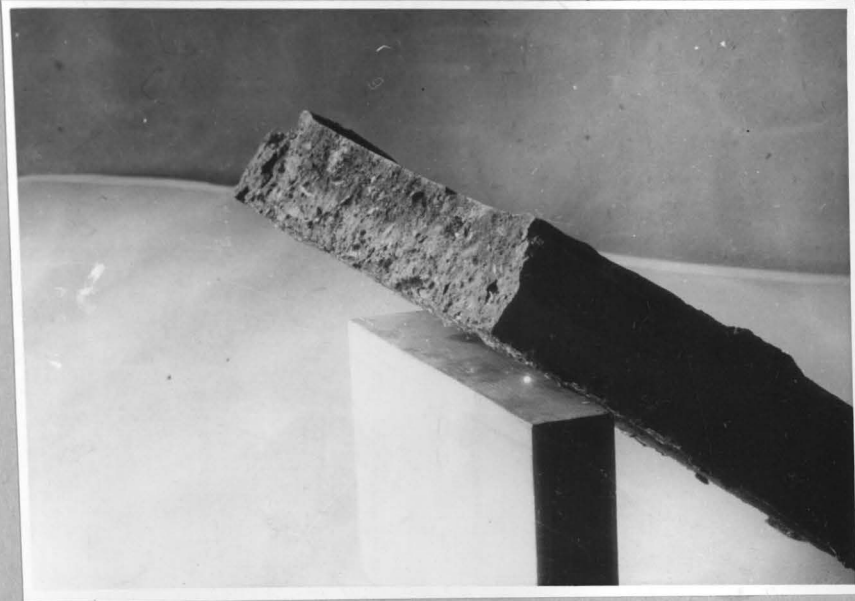


Unvollständiger Riss über gesamte Belagsbreite
und einen Teil des Querschnitts



Unvollständiger Riss über einen Teil der Be-
lagsbreite und einen Teil des Querschnitts

Rissbilder Straßengußasphalt I



Unvollständiger Riss über die gesamte Belagsbreite
und einen Teil des Querschnitts



2 unvollständige Risse über einen Teil der Be-
lagsbreite und einen Teil des Querschnitts

